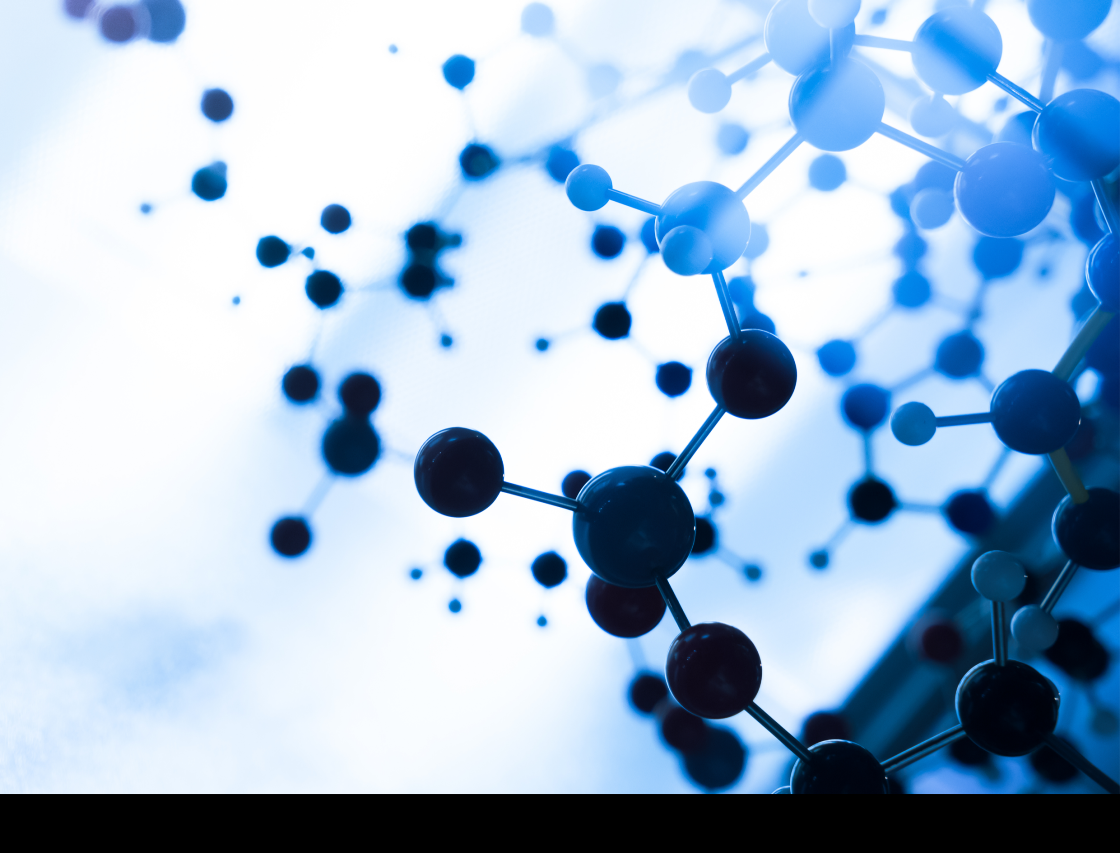


مقدمة قصيرة جدًّا

الجزيئات

فيليب بول

الجزيئات

الجزيئات

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
فيليب بول

ترجمة
محمد عبد الرحمن إسماعيل

مراجعة
محمد فتحي خضر



الجزيئات
Molecules

فيليب بول
Philip Ball

الطبعة الأولى ٢٠١٦م
رقم إيداع ١٩٩٤٠ / ٢٠١٥
جميع الحقوق محفوظة للناشر مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦ / ٨ / ٢٠١٢

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٠٦٣٥٢ ٢٠٢ + **فاكس:** ٣٥٣٦٥٨٥٣ ٢٠٢ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

بول، فيليب.
الجزيئات: مقدمة قصيرة جدًّا/تأليف فيليب بول.
تدمك: ٩ ٤١٤ ٧٦٨ ٩٧٧ ٩٧٨

١–الجزيئات

أ–العنوان

٥٤١,٢٢

تصميم الغلاف: محمد الطوبجي.

المحتويات

تقديم

حين أَلَّف ألكسندر فندلاي كتابه «الكيمياء في خدمة الإنسان» عام ١٩١٦، كانت ثمة حاجة ملحَّة للإعلانِ عن المنافع التي جلبتها الكيمياء للعالم ونَشْرِها. وبعد مرور تسعة عقود، ربما يأمل مَن يكتبون عن الكيمياء أن لو تحرروا من وطأة هذا العبء الثقيل. ولكن الأمر ليس كذلك؛ فرغم أهم ما أسهمت به الكيمياء في المجتمع — وهو إطالة العُمر بفضل الرعاية الصحية القائمة على المعالجة الكيميائية — فإن كلمات فندلاي لا يزال وقعها على آذاننا مألوفًا:

> إن الناس بصفة عامة — بسبب جهلهم بالعلوم وفوائدها — ينظرون بعين الشك والارتياب تجاه أولئك الذين يستطيعون وحدهم توسيع نطاق صناعاتهم وزيادة كفاءة أعمالهم.

ليس من المُستَبْعَد غالبًا أن تكون نفس هذه النبرة الشديدة كامنة وراء الجهود التي تبذلها الصناعات الكيميائية ومؤيدوها في سبيل الدفاع عن الكيمياء ضد ما يوجهه إليها العامة من ازدراء واستهجان. لكن ثمة مشكلة؛ ففي حين تُؤخذ المواد الكيميائية التي تعود بالنفع على الناس على أنها أشياء مسلَّم بها بمجرد تداولها في الأسواق، فإن المواد الكيميائية الضارة تبقى في الأذهان لسنوات. لا أحدَ ينكر أن ما تبذله شركات الصناعات الكيميائية والحكومات من جهود للتنصل من مسئوليتها عن مآسٍ سببتها مواد كيميائية مثل الثاليدوميد والبوبال، أو كوارث قريبة مثل استنزاف طبقة الأوزون؛ قد قلَّلت كثيرًا من مصداقيتها وقدرتها على الدفاع عن نفسها وتبرير أعمالها.

ومن ثمَّ، فإننا ندخل القرن الحادي والعشرين ويراودنا شعور قوي بأن ما يُسمى «كيميائي» أو «اصطناعي» سيئ، وما يُسمى «طبيعي» جيد.

الحل التقليدي أن نضع قائمة بالمنافع التي منحتنا إياها الكيمياءُ، وهي قائمة طويلة بالفعل. لعلَّ الذين ينتقدون الكيمياء الصناعية يستمتعون بكثير من منتجاتها، ولكني أعتقد أن عبارة «الكيمياء في خدمة الإنسان» لم تَعُد الشيءَ الذي نحتاجه، وهذا لأسباب؛ منها أنها تُرسِّخ الانطباع بأن المشروعات العلمية والتكنولوجية ذات النظرة الأحادية الصلدة لديها التزام عمومًا بخدمة أغراضها الخاصة. فأي ثقافة، تبدو في أعين غير المنتمين إليها ثقافةً ذاتَ نظرة أحادية صلدة؛ ومن ثمَّ فمِن المحتمَل أن تكون لها مخاطرها. سيكون من الرائع أن يأتي اليوم الذي يدرك فيه عامة الناس ما يقع بين الكيميائيين من مجادلاتٍ شديدة حول إن كان يجب حظر هذا المنتج الكيميائي أو ذاك أو تقييد إنتاجه، أو اليوم الذي يدركون فيه الحقيقة القائلة بأن بعض الكيميائيين يعملون في منشآت عسكرية صارمة، بينما يعمل آخرون خارجها لأهداف مغايرة تمامًا. ربما سنبدأ حينئذٍ في النظر إلى العلم بوصفه نشاطًا بشريًّا.

لكنْ، ثاني أمر علينا أن نَعْلمه هو أن الكيمياء ليست مجرد شيء يمكن ترويضه أو تجنيده قسرًا لخدمة الإنسان؛ فالكيمياء هي ما تمنح الإنسان — رجلًا كان أو امرأةً — وسائرَ ما في الطبيعة، هويتَه المميزةَ. يصعب حاليًّا أن نتجاهل المفاهيم السلبية لمصطلحَي «كيميائي» و«اصطناعي»، لكن هذه المفاهيم لم تُلقِ بظلالها بعدُ على مصطلح «جزيئي». وربما نستطيع من خلال فهمنا لطبيعتنا الجزيئية البدءَ في تقديرِ ما تقدمه الكيمياء، فضلًا عن إدراك السبب في أن بعض المواد (طبيعيةً كانت أو اصطناعيةً) تصيبنا بالتسمُّم والبعض الآخر يشفينا.

لهذا السبب، يُحتمَل أن يعارضني بعض الكيميائيين لكتابة دليل عن الجزيئات، يركِّز بقدر كبير على جزيئات الحياة؛ أي على علم الكيمياء الحيوية. فما أردت أن أوضِّحه هو أن العمليات الجزيئية التي تتحكَّم في أجسادنا لا تختلف كثيرًا عن تلك التي ينشد الكيميائيون — وأفضِّل أن أسمِّيَهم «علماء الجزيئات» — استحداثَها. في الواقع، تزداد الحدود ضبابيةً؛ فنحن نستخدم بالفعل الجزيئات الطبيعية في مجال التكنولوجيا، كما نستخدم الجزيئات الاصطناعية في الحفاظ على ما نعتبره «طبيعيًّا».

لقد استفدتُ كثيرًا — في خضمِّ حديثِي هذا عن الجزيئات — من نصائح بعض الخبراء؛ وهم: كريج بيسون، وبول كالفرت، وجو هوارد، وإريك كول، وتوم مور، وجوناثان سكولي؛ الذين أتوجَّه إليهم بخالص الشكر والتقدير.

بدأ هذا الكتاب مسيرته، كما سيُنْهيها، بوصفه مساهمة في سلسلة «مقدمة قصيرة جدًّا» التي تصدرها مطبعة جامعة أكسفورد، وإنني لشديد الامتنان لِشيلي كوكس؛ لِمَا أبدته من تأييد لهذا الكتاب ساعد في إخراجه إلى النور خلال فترة قصيرة.

فيليب بول

لندن

يناير ٢٠٠١

شكر وتقدير

يتقدم المؤلِّف والناشِر بالشكر والعرفان للسماح لهما باستخدام المواد التالية المحميَّة بموجب حقوق التأليف والنشر:

مقتطف من رواية «أرشيف دالكي»، تأليف فلان أوبريان (حقوق الطبع والنشر لمؤسسة الراحِل بريان أونولان)، التي أُعيد إصدارها بإذنٍ من شركة إيه إم هيث وشركاه ذات المسئولية المحدودة بالنيابة عن المؤسسة.

مقتطف من كتاب «الجدول الدوري» تأليف بريمو ليفي، الذي ترجمه ريموند روزنثال، حقوق الطبع والنشر لعام ١٩٨٤، لشوكن بوكس، وهي فرع من مؤسسة راندوم هاوس، واستُخدِم بإذن من شوكن بوكس.

مقتطف من رواية «قوس الجاذبية»، تأليف توماس بنشون، حقوق الطبع والنشر لعام ١٩٧٣ لتوماس بنشون، وأُعيدت طباعتها بإذن من وكالة ميلاني جاكسون ذات المسئولية المحدودة.

الفصل الأول

صُنع الجزيئات: تلك الأشياء الخفية

أومأ رقيب الشرطة إلى النادل، طالبًا خمر الشعير لنفسه وزجاجةً صغيرة منها لصديقه، ثم مال للأمام في ثقة سائلًا إياه:

– هل صادفتَ يومًا تلك «الجزيئات» أو سمعت قولًا عنها؟

– نعم بالطبع.

– هل سيدهشك أن تعرف أن «نظرية الجزيئات» تمارس تأثيرها في دائرة دالكي؟

– حسنًا ... نعم ولا!

– إنها تُحدِث دمارًا مروِّعًا! ونِصْف الناس مصابون بها، إنها أسوأ من مرض الجُدري!

– ألا يمكن أن يعالجها طبيب المستوصف أو يدرِّسها المعلمون المحليون، أم هل تعتقد أنها أحد الشئون التي يجب أن يهتم بها حاكِم البلدة؟

– إن الأمر برُمَّته في يد مجلس المقاطعة (هكذا أجاب بلهجة حازمة).

– يبدو هذا الأمر معقدًا للغاية!

في الحقيقة، لقد كتب فلان أوبريان أقصر المقدمات عن الجزيئات، وكان أكثر براعة وجاذبية في حديثه مني. لقد أراد ذلك الرجل أن يقدِّم معرفته العلمية ببساطة، وكأنه يناقش أمرًا مثل محصول البطاطس أو الحالة السيئة للطرق خارج العاصمة الأيرلندية دبلن. ويمكننا الإفادة بقدر أكبر من تلك الحكمة التي يتقاسمها رقيب الشرطة فوتريل

مع صديقه ميك في فندق متروبول الذي يقع في الشارع الرئيسي بمدينة دبلن، وتتجلى في الحوار التالي:

– هل درَسْت من قبل «نظرية الجزيئات» حين كنت صغير السن؟ كان هذا سؤال فوتريل، فأجاب ميك قائلًا: لا، ليس بالتفصيل.

– يا للأسف الشديد! هذه جريمة شنيعة، ومفاقمة عويصة! (هكذا قال فوتريل في حدة)، ولكنني سأشرح لك هذا الموضوع ... إن كل شيء لدينا يتكون من جزيئات صغيرة في داخله، وهي تتطاير حولنا في دوائر متحدة المركز، وكذلك في أقواس وقطاعات ومسارات أخرى متنوعة أكثر من أن نتمكن من الإتيان على ذكرها جميعًا، ولا تبقى كما هي مطلقًا ولا تستقر، ولكنها تدوم وتحوم قريبًا وبعيدًا ثم تعود مجددًا، فهي تتحرك طوال الوقت، هل تفطن لما أقول؟ إنها الجزيئات!

– أعتقد أنني أفهمك!

– إنها بالغة النشاط والحيوية مثل عشرين شيطانًا من الجن يتراقصون فوق شواهد القبور! ولنأخذ الخروف كمثال: فما الخروف إلا ملايين من «الجزيئات» الصغيرة التي تدور وتدور — حاملةً صفات الخِراف — في حركات تشنجية معقدة ... كأنه وعاء يغلي بما فيه!

ما هو الخروف؟ هذا السؤال البسيط (في كثير من مظاهره) كافٍ جدًّا لجعل العلماء منشغلين لمئات السنين، وسيستمر كذلك لسنوات كثيرة قادمة؛ فعِلْم الجزيئات يعطي إجابة مضمَّنة في سلسلة هرمية من الإجابات. إنه معنيٌّ بتلك الملايين من «الجزيئات»، والخروف توليفة من أنواع كثيرة من الجزيئات، وهي عشرات الآلاف من الأنواع المختلفة، التي لا تقتصر على الخِراف بالطبع، وإنما توجد كذلك في البشر وفي العُشب وفي السماء والمحيطات.

لكن العلم — الذي يبحث عن مستويات من الفهم أكثر عمقًا — لا يترك الأمور على عواهنها. أليست جزيئات الخروف مكوَّنة من ذرات؟ أَوَليست الذرات مكوَّنة من دقائق دون ذرية مثل الإلكترونات والبروتونات؟ أَوَليست تلك الدقائق مكوَّنة بدورها من دقائق دونها مثل الكواركات والجلوونات؟ فمَنْ ذا الذي يمكنه التكهن بما تحتويه من أسرار داخل حدودها الدقيقة المبهمة؟

– إن الجزيئات نظرية معقدة جدًّا، ويمكن إثباتها بعلم الجبر، ولكن قد تحتاج إلى حسابها تدريجيًّا، باستخدام المساطر وجيوب التمام وأدوات أخرى مألوفة، ثم في نهاية

الأمر لن تصدق ما أثبتَّه مطلقًا. إذا حدث هذا، فَسَيَتَعَيَّن عليك أن تعود إلى الوراء، حتى تصل إلى وضعٍ تستطيع أن تصدق فيه الحقائق والحسابات التي لديك تمامًا على أساس ما وَرَدَ في كتاب الجبر، ثم تستمر مجددًا من ذلك الوضع بعينه إلى أن تحصل على الصورة الكاملة، وقد صدقتها تمامًا دون أن تخلِّف وراءك الشذرات التي لم تصدق إلا نصفها أو أي شك في رأسك يؤرِّقك كأنك تبحث عن زر قميصك تحت أغطية سريرك!

– هذا حقيقي جدًّا! هكذا أجاب ميك بثقة.

إنه حقًّا لَأَمرٌ معقَّد أن تبحث في ماهية الجزيئات إذا أردتَ أن تبدأ سُلَّم العلم من درجة أكثر انخفاضًا (أو لِنَقُلْ أكثر عمقًا) ثم تصعد لأعلى. ويكون هذا ضروريًّا إذا أراد المرء أن يفهم تمامًا الأسباب الكامنة وراء سلوك الجزيئات؛ ومن ثمَّ أسباب إظهار المادة لتلك السلسلة المميزة من الخصائص، أيًّا كانت المادة: خروفًا أم صخرة أم لوحًا من زجاج النوافذ أم غير ذلك. ولكن الكثير من العلماء الذين يبحثون في الجزيئات ليسوا في حاجة إلى الاكتراث بكلِّ ما في علم الجبر؛ إذ يمكن بصفة عامة اختصار مضامينه في قواعد أساسية عن كيفية تفاعل الجزيئات فيما بينها. كانت الصناعة الكيميائية مشروعًا مزدهرًا قبل أن تجد الكيمياء نصيبها من علم الرياضيات؛ ومن ثم يمكننا القول إن الجزيئات لن تؤرِّقك على أي حال.

ماذا عن الجدول الدوري؟

من العجيب أن فلان أوبريان حين اقتبس ذلك الجواب الذي دار بين الرقيب فوتريل وميك من كتاب «أرشيف داكلي»، ونَقَلَه إلى الرواية الأكثر شهرة بين رواياته — التي تسمى «الشرطي الثالث» (ونُشرت بعد وفاته في عام ١٩٦٦) — قد عمد إلى حذف عبارة «نظرية الجزيئات»، وكتب بدلًا منها «نظرية الذرات»، وهنا يكمن مربط الفرس؛ الغموض الذي يكتنف ما صُنعت منه الأشياء: أهي الذرات أم الجزيئات؟ وهنا يعطينا الكيميائيون أجوبةً مختلطة. إن الشفرة الأيقونية لديهم هي الجدول الدوري، وهو عبارة عن قائمة من اثنين وتسعين عنصرًا طبيعيًّا (أُضيفَ إليها بعض العناصر الاصطناعية غير المستقرة)، مرتَّبة على نسق يساعد الكيميائيين على الإفادة منها. إن أشهر كتاب «عن» الكيمياء هو ذلك الذي أسماه الكيميائي والكاتب الإيطالي بريمو ليفي «الجدول الدوري»، والذي يتحدث عن العناصر؛ تلك اللبنات البنائية للمادة، وهو بهذا يقوِّي الانطباع بأن الكيمياء تبدأ بتلك الشبكة غير المنتظمة في شكلها من الرموز. حين كنت تلميذًا بالمدرسة كانوا يشجعونني

على تعلُّم فن الاستظهار كي أتذكر العناصر التي في الصفين الأول والثاني في الجدول، وهما الأكثر أهمية، ولكن في مرحلة تالية من التعلم كان يتعين عليَّ في علم الكيمياء أن أحفظ الجدول الدوري كله، وأستظهره من ذاكرتي، بحيث أعرف أن الإيريديوم يقع فوق الكوبالت، وأن اليوروبيوم ينحصر كالشطيرة بين السماريوم والجادولينيوم. ومع ذلك فإنني أشك أن تقع عيني يومًا على السماريوم (وإن كان اليوروبيوم يلتمع متوهجًا من شاشات التليفزيون لدينا).

العناصر: في كتاب «الجدول الدوري» لبريمو ليفي

هناك ما يُعرف بالغازات الخاملة في الهواء الذي نتنفسه، وهي تحمل أسماءً إغريقية عجيبة متفاوتة في اشتقاقها، وتعني «الجديد» و«الخفي» و«غير النشط» و«الغريب»، وهي في الواقع خاملة جدًّا، ومستقرة في حالتها هذه لدرجة أنها لا تدخل في أي تفاعل كيميائي، ولا تتحد مع أي عنصر آخر؛ ولهذا السبب بالذات لم تُكتشَف على مدى قرون عدة. ولكن في وقت قريب نسبيًّا في عام ١٩٦٢، نجح عالم كيميائي دءوب بعد جهود طويلة وبارعة في إجبار غاز الزينون (أي الغريب) على الاتحاد لمدة قصيرة جدًّا مع غاز الفلور الشديد الشراهة والنشاط، وبدا هذا العمل الرائع استثنائيًّا للغاية، حتى إن هذا العالِم حصل على جائزة نوبل.

عنصر الصوديوم فلز سريع التحلل، وهو لا يعتبر من الفلزات إلا من خلال المعنى الكيميائي لهذه الكلمة، وليس بالمعنى اليومي الدارج، فهو ليس صلبًا ولا حتى قابلًا للطرق، بل إنه لين مثل الشمع، وهو لا يلمع، أو لِنَقُلْ إنه يلمع فقط إذا تم حفظه بعناية فائقة غير عادية، وإلا فإنه يتفاعل في لحظات معدودة مع الهواء، فتتكون عليه قشرة جافة قبيحة الشكل، وهو يتفاعل بسرعة أكبر مع الماء، بل ويطفو فوقه (هل تتخيل فلزًّا يطفو على الماء؟!) ويتراقص حينئذٍ بجنون مطلِقًا غاز الهيدروجين …

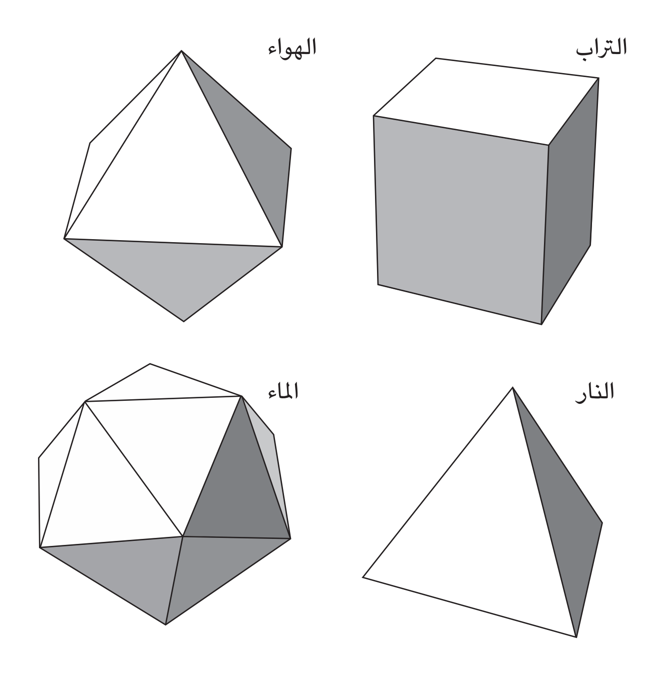
في أحد الأيام وزنتُ جرامًا من السكر في بوتقة من البلاتين (وهو معدن ثمين جدًّا) لحرقه على النار، فتصاعدت في الهواء الملوث في معملي رائحة السكر المحترق التي نعرفها في مطابخنا، ولكن بعد هذا فورًا زاد لهيب النار فتكونت رائحة مختلفة كثيرًا؛ رائحة معدنية تشبه رائحة الثوم، وهي غير عضوية بالطبع، ولا يمكن أن تكون عضوية، ولاكتشاف هذا يلزم أن يتمتع الكيميائي بحاسة شم سليمة. وعند هذا الحد يصعب أن يخطئ المرء، فما عليك سوى أن ترشح المحلول، وتضيف إليه أحد الأحماض، وتأخذ المادة المتكونة وتمرر فيها غاز كبريتيد الهيدروجين فيتكون راسب أصفر، وهو الأندريد الزرنيخي (اللامائي)، باختصار إنه الزرنيخ الذي يسمى الماكيولينوم. إنه الزرنيخ السام المذكور في الحكايات المروية عن ميثراداتس ومدام بوفاري وغيرهما.

بريمو ليفي، كتاب «الجدول الدوري» (١٩٧٥)

إلا أن علم الكيمياء تحدَّث بشكل عفوي فقط عن خصائص العناصر، ويمكن أن يُقدِم علم الجزيئات على تجاهل الكثير منها إن لم يكن أغلبها. ينتمي الجدول الدوري بالفعل إلى ذلك الحقل الذي تتحول الكيمياء عنده إلى فيزياء، والذي يجب عنده أن نستعين بعلم الجبر وجيوب التمام كي نفسر سبب تكوين ذرات العناصر لتلك الاتحادات بعينها التي تسمَّى الجزيئات. يُعد هذا الجدول واحدًا من أكثر الاكتشافات جمالًا وعمقًا في القرن التاسع عشر، ولكن حتى اختراع علم ميكانيكا الكم على يد علماء الفيزياء في القرن العشرين، لم يكن يَسَعُ المرءَ سوى النظر إليه باعتباره شفرة غامضة، أو نوعًا من لوحات القص واللصق التي تذكِّرنا بأن العناصر تأتي في صورة عائلات، وأن أفراد كل عائلة منها يملكون ميولًا متشابهة.

لَعلِّي أكون متعجلًا إذا استغنيت عن الحديث عن الجدول الدوري، فعلى الأقل يجب ألا أفعل هذا دون أن ألتزم بأجندة عمل خاصة.

إن التاريخ التقليدي للكيمياء يعرض هذا العلم على أنه بحث من أجل فهم المادة؛ أي التساؤل: من أي شيء صُنعت المادة؟ وهذا يربط الكيمياء بالفلسفة اليونانية القديمة، بمحاولات ليوكيبوس وتلميذه ديموقريطوس لصياغة نظرية ذرية للمادة في القرنين الخامس والرابع قبل الميلاد. وهذا التاريخ يحكي سردًا يبدأ من العناصر الأربعة لإيمبيدوكليس، وهي: التراب والهواء والنار والماء، ويمر بما عرضه أفلاطون من تزاوُج بين نظرية العناصر والمذهب الذري (شكل ١-١)، ويلتفُّ بحذر حول ما كان يعتقده الخيميائيون (المشتغلون بالكيمياء القديمة) في العصور الوسطى من تحويل العناصر الرخيصة إلى نفيسة، ثم يستقر في سلاسة عند نظرية اللاهوب (الفلوجستون) في القرن الثامن عشر. سنشاهد روبرت بويل وهو يعيد تعريف فكرة العنصر في عام ١٦٦١ (وإن كان عمله في الواقع لا يرقى إلى منزلةِ إعادة التعريف الكاملةِ على الإطلاق)، ونرى نموذجَ العناصر الأربعة العتيقَ وهو يتقوض قبل اكتشاف مواد جديدة غير قابلة للاختزال، ونرى أنطوان لافوازييه وهو يزعزع نظرية اللاهوب، ويضع بدلًا منها نظرية الأكسجين قبل أن يفقد رأسه بالمقصلة في عام ١٧٩٤. بعد ذلك قدم جون دالتون النظرية الذرية الحديثة في عام ١٨٠٠، وتمددت قائمة العناصر بدرجة كبيرة خلال القرن التاسع عشر، ثم رتبها ديميتري مندليف في شكلٍ بنائيٍّ ذي برجين هو جدول مندليف الدوري، ثم مُلئت الفراغات فيما بينهما تدريجيًّا وصولًا إلى اليورانيوم (الذي كان معروفًا منذ عام ١٧٨٩)، وبعد ذلك فسَّر فولفجانج باولي وغيره من فيزيائيي الكم شكلَ الجدول في عقد العشرينيات من القرن العشرين.



شكل ١-١: ذرات أفلاطون. كان ذلك الفيلسوف الإغريقي يَعتقد أن أصغر دقائق العناصر الأربعة، التي يُعتقَد أنها تُشكِّل كل شيء مادي، لها أشكال هندسية منتظمة.

وهكذا اقتربت المهمة من نهايتها، بل إن أحد الكتَّاب في مجال العلوم، ويدعى جون هوجران، كتب في كتاب «نهاية العلوم» يقول إن هذا يعني أن علم الكيمياء أيضًا قد انتهى منذ أن حصل على ختم التصديق من نظرية الكَم. والمعنى المتضمن في عدة كتب أخرى أكثر حداثة عن مستقبل العلوم هو أن ذلك العلم الذي يظهر غيابه في الوقت الحاضر، قد استُهلك من كلتا نهايتيه؛ فعلى مستواه الأساسي قد تحول إلى فيزياء (بما فيه ذلك الفرع العلمي العظيم، الذي تجاهله الناس، المسمَّى فيزياء المادة المكثفة، والذي يبحث في كيفية سلوك المادة الملموسة)، وعلى مستواه الأكثر تعقيدًا صار الآن حقلًا لعلماء الأحياء، الذين بسطوا حدود عالمهم بحيث صار يشمل الميكانيكا الجزيئية للخلية.

إلا أن هذه الحروب الأكاديمية تُخفي حقيقةً أكثر إثارة للاهتمام، وهي الحقيقة العجيبة التي تقول إن الكثير من تواريخ العلوم قد كتبها علماء فيزياء كانوا يميلون

إلى تقديم العلوم على أنها سلسلة من الأسئلة التي تُطرَح ثم يجاب عنها. وقد يكون من المفيد أن نرى القصة وهي تُحكى من جانب أحد المهندسين، الذي قد يميل بالفطرة لأن يَطرح السؤال: ماذا يمكننا أن نصنع؟ فعلى الرغم من أن بعض علماء الكيمياء الأوائل كانوا يريدون تشريح المادة، من الناحيتين الفيزيقية والميتافيزيقية، كان البعض الآخر يعيد ترتيبها بشغف؛ ولهذا يتخذ علم الجزيئات اتجاهًا إبداعيًّا وآخر تحليليًّا، وكان يُعنى في فترات مختلفة من التاريخ بصناعة أوعية السيراميك والأصباغ والألوان والمواد البلاستيكية، وغير ذلك من مواد اصطناعية وعقاقير وأغلفة واقية ومكونات إلكترونية وآلات في حجم البكتيريا. ويقول رونالد هوفمان الحائز جائزةَ نوبل في الكيمياء: «الأمر الغريب أن علماء الكيمياء يتعين عليهم أن يتقبلوا المجاز المتعلق بعملية الاكتشاف»، ثم يستطرد قائلًا:

> إن الكيمياء هي علم الجزيئات وتحولاتها. بعض الجزيئات موجودة فعلًا وتنتظر منا أن نعرفها … ولكن توجد جزيئات أخرى كثيرة في علم الكيمياء صنعناها نحن في المعمل … في قلب [الكيمياء] يوجد جزيء مصنوع، إما بعملية طبيعية وإما بيدٍ بشرية.

وأحسب أن الجامعات التي تُخفي أقسام الكيمياء لديها تحت لافتة «العلوم الجزيئية» تسلك على الأرجح المسار الصحيح، فهذا ببساطة يطلق العِنان للجدول الدوري، ويدع الكيميائي حرًّا لأن يسمو إلى عالمٍ من صناعة الأشياء، عالمٍ غير أفلاطوني يتم فيه تصميم الجزيئات وصناعتها كي «تؤدي» وظائف معينة، مثل علاج حالات العدوى الفيروسية أو اختزان المعلومات أو تقوية الجسور وتدعيمها.

وقد تحرَّك بريمو ليفي باعتباره كيميائيًّا صناعيًّا في هذا العالم، وكان يشعر بشيء من الأسف فيما يتعلق بهذا العلم الجزيئي، فأسماه «كيمياء «وضيعة» … يمكن تسميتها بكيمياء المطبخ.» ولكن قوة تلك الكيمياء الوضيعة هائلة حقًّا؛ إذ تعمل على تحويل مليارات الدولارات كل عام، ويمكن أن تجعل المريض سليمًا والسليم مريضًا. كما دُمرت مدينتا هامبورج ودرسدن الألمانيتان بفعل الكيمياء الوضيعة، وصارت الحروب الكيميائية والبيوكيميائية الآن مثار خوف وهلع في دوائر الغرب أكثر من الحرب النووية. يعتقد الكثير من الناس أن القنبلة النووية ذاتها هي نتاج لعلم الفيزياء، ولكن مجرد كتابة معادلة «الطاقة = حاصل ضرب الكتلة في مربع سرعة الضوء» لم تكُن السبب وراء

قنبلة هيروشيما، وإنما ما يقف وراءها هو عملية فصل جزيئات مركَّبات اليورانيوم المتمايزة نظائريًّا. وفي روايته «قوس قزح الجاذبية»، لم يكن يخامر توماس بينشون شكٌّ في موقع القوة الحقيقية للعلوم: فلم يكن الشيء الشرير الذي ظهر في روايته بعد نهاية الحرب العالمية الثانية هي القنبلة النووية، وإنما مادة بلاستيكية جديدة عبارة عن «بوليمر أروماتي متغاير الحلقات» تدعى إيميبولكس جي، تم استحداثها نتيجة مؤامرة بين شركات أوروبية كيميائية عملاقة هي: آي جي فاربن وسيبا وجايجي وشِل للبترول وآي سي آي. الرسالة التي أريد توصيلها أن المادة يعلو صوتها على النظريات.[1]

فهل يعني هذا أن العلوم الجزيئية سيئة؟ بالطبع لا … ولكن يعني أنها صندوق يعج بالاحتمالات، وهي احتمالات رائعة ملهمة وإبداعية، وقد تكون فظيعة أو مخيفة؛ منها أشياء دنيوية، ولكنها مفيدة، وأشياء شاذة، وأشياء يصعب فهمها. وقد تساعد العلوم الجزيئية الناس يومًا ما في الحصول على كبد جديدة. وقد رسم الفنانون رافائيل وروبنز ورينوار لوحاتهم باستخدام الجزيئات، فالجزيئات هي أصل الحياة.

التركيب الاصطناعي (التخليقي) ورواية توماس بينشون: «قوس قزح الجاذبية»

تعود أصول مادة إيميبولكس جي إلى بحث مبكر أَجْرَته شركة دوبون الكيميائية. إن علم تصنيع المواد البلاستيكية له تقاليد عظيمة ومسار أساسي، تتحكم فيها شركة دوبون وأحد العاملين بها ويدعى كاروترز، ويشتهر بأنه «التخليقي العظيم». وكانت دراسته الكلاسيكية عن الجزيئات الكبيرة قد امتدت عبر عقد العشرينيات وأوصلَتْنا مباشرة إلى عصر النايلون، الذي لا يقتصر على كونه متعةً لجسد الإنسان المرفَّه وشيئًا ملائمًا للمتمرد المسلح، ولكنه في الوقت نفسه يُعد إيذانًا بانطلاقة قوية لعصر البلاستيك؛ بأن الكيميائيين لم يعودوا تحت رحمة الطبيعة، بل يمكنهم أن يقرروا الآن الخصائص التي يحتاجونها للجزيئات، ثم يمضون قدمًا ويقومون ببنائها تخليقيًّا … وبهذا يمكن تركيب أيِّ مادة مطلوبة ذات وزن جزيئي كبير حسب الطلب وتشكيلها كيميائيًّا في شكل حلقي متغاير الحلقات، والإمساك بها ونَظْمها في سلسلة باستخدام حلقات البنزين أو الحلقات الأروماتية الأكثر «طبيعية». تلك السلاسل تعرف باسم البوليمرات الأروماتية المتغايرة الحلقات، وكان أحد تلك السلاسل الافتراضية، التي خرج إلينا بها العالم جامف قبل اندلاع الحرب مباشرة، قد تم تعديله فيما بعدُ ليصير الإيميبولكس جي.

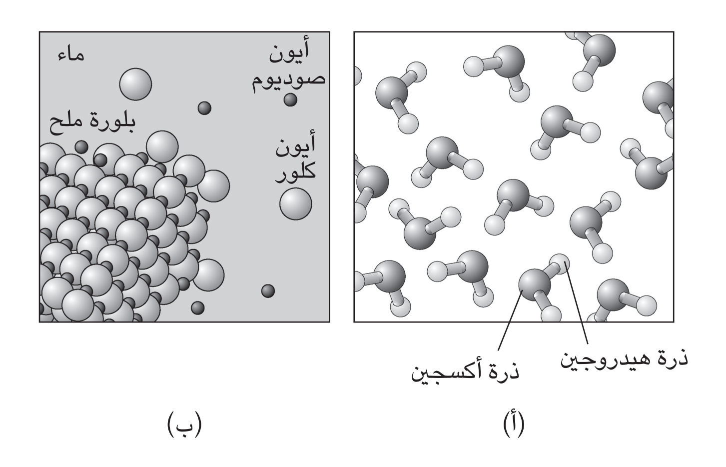
توماس بينشون، رواية «قوس قزح الجاذبية» (١٩٧٣)

ما هي الجزيئات؟

والسؤال الآن: هل كل شيء يتألف من جزيئات؟ الإجابة: ليس بالضبط؛ فجميع المواد (إلا داخل بعض البيئات الفيزيائية الفلكية الغريبة) تتكون من الذرات، ولكن الذرات لا تتشكل دائمًا في صورة جزيئات. (ولا يمكنني أن أحدد إن كان فلان أوبريان قد حوَّل كلمة الجزيئات التي وردت على لسان الرقيب فوتريل إلى كلمة ذرات لأنه كان يفهم — أو لم يكن يفهم — الفارق بينهما.) معظم الذرات شديد التفاعلية — فلديها ميل للارتباط مع ذرات أخرى — وتُعد الجزيئات تجمعات من الذرات قد ارتبطت سويًّا في شكل اتحادات قد تحتوي على أي شيء، وقد تصل أعدادها إلى ملايين عدة.

ولكنَّ ثمة تمييزًا آخر دقيقًا يجب إجراؤه؛ فقد كان الرقيب فوتريل في رواية فلان أوبريان يتحدث عن جزيئات الحجارة والحديد. وإذا شئنا الدقة فسنقول إنه لا وجود لشيء كهذا، على الأقل لا توجد في كتل الحجارة أو الحديد التي نصادفها كل يوم، ولكننا نعني بالجزيئات — بصفة عامة — أنها تجمعات متميزة يمكن عدُّها من ذرات. في جزيء الماء توجد ثلاث ذرات؛ ذرتان من الهيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين، ويحتوي الكوب من الماء على تريليونات فوق تريليونات من الذرات، ولكن العينة السريعة التي تؤخذ من هذا السائل — إذا أمكن أن تكشف عن أي تفاصيل دقيقة — تُظهر أنها في أي لحظة بعينها تكون الذرات كلها تقريبًا متجمعة في شكل جزيئات يتكون كلٌّ منها من ثلاث ذرات، كما أسلفنا، مثل حشد هائل من أُسَر تتكون كل أسرة منها من ثلاثة أفراد متشابكي الأيدي (شكل ١-٢أ).

وعلى العكس من هذا، نجد أن ذرات الحديد لا تتجمع في شكل جزيئات متمايزة، ولكنها تتكدس معًا مثل قنابل المدفع في نسق منتظم يستمر على النحو ذاته، مثل كتيبة منظمة من الجنود، ولا يستطيع المرء تمييز أي مجموعات من الذرات تكون متساوية الأبعاد فيما بينها. ونفس الشيء ينطبق على ذرات الصوديوم والكلور في أي بلورة من كلوريد الصوديوم (ملح المائدة (شكل ١-٢ب)). وحين ينصهر الحديد تتدافع ذراته فيما بينها كحشد جامع من الناس، ولكن حين يذوب الثلج، يبدو الأمر كأن ذرات الهيدروجين والأكسجين تستمر في التشابك يدًا بيد بأوضاعها الثلاثية مع تفكك بلوراته. ويمكننا القول إن الثلج مادة صلبة جزيئية — تتجمع فيه الذرات في شكل جزيئات — بينما الحديد والملح الصخري ليسا كذلك.



شكل ١-٢: الماء (أ) يتكون من جزيئات منفصلة متمايزة ثلاثية الذرات، وترتبط الذرات بروابط كيميائية قوية، ولكن الملح (ب) على العكس من هذا يتكون من مجموعة ذرات مشحونة (تسمى أيونات) من الصوديوم والكلور، ولا توجد فيه تجمعات ذرية متميزة. وحين يذوب الملح في الماء تتفكك تركيبة الأيونات بعضها عن بعض تدريجيًّا.

تتخذ بعض العناصر النقية صورًا جزيئية، والبعض الآخر لا يفعل هذا، وكقاعدة عامة تقريبية نقول إن الفلزات مثل الحديد غير جزيئية، بينما اللافلزات جزيئية؛ فالنيتروجين المتجمد، على سبيل المثال، يتكون من جزيئات، يحتوي كلٌّ منها على ذرتين. وفي الفسفور تكوِّن الذرات مجموعات جزيئية من أربع، وفي الكبريت يمكن أن ترتبط الذرات في حلقات جزيئية من ثمانٍ. قد يبدو من الظلم بعض الشيء ألا نجد وسيلة، بمجرد النظر للمادة، تُعلِمنا إن كانت وحداتها البنائية الأساسية هي ذرات أم اتحادات جزيئية من الذرات، لكن لا وجود لهذه الوسيلة. (لكن ليس من العسير على العلماء أن يكتشفوا ذلك على أي حال.)

وهكذا يعتبر الجزيء مفهومًا مائعًا غير محدد تمامًا؛ إذ يعتمد بالأساس على مسألة الحجم. لماذا إذن نتجشم العناء لتمييز الجزيئات بأي حال بدلًا من الاكتفاء بالحديث عن المادة بصفة عامة؟ أعتقد أن السبب هو أن الجزيئات هي الوحدات الأصغر من المادة «ذات المعنى» في علم الكيمياء؛ فمن خلال الجزيئات، لا الذرات، يمكن أن يحكي المرء قصصًا

في العالم تحت المجهري. إن الجزيئات بمنزلة الكلمات، والذرات هي الحروف فحسب. بطبيعة الحال، أحيانًا ما يشكل حرف واحد كلمة كاملة، ولكن أغلب الكلمات هي تكتلات محدودة من حروف متعددة رُتِّبَت في نظام معين، وكثيرًا ما نجد أن الكلمات الأطول توصل معانيَ أكثر براعة ودقة. وفي الجزيئات، كما في الكلمات، يكون للنسق الذي تترتب به الأجزاء المكوِّنة أهميتُه؛ فكلمتا «كلمات» و«لكمات» مثلًا تختلفان في المعنى تمامًا رغم أنهما مكونتين من الحروف عينها.

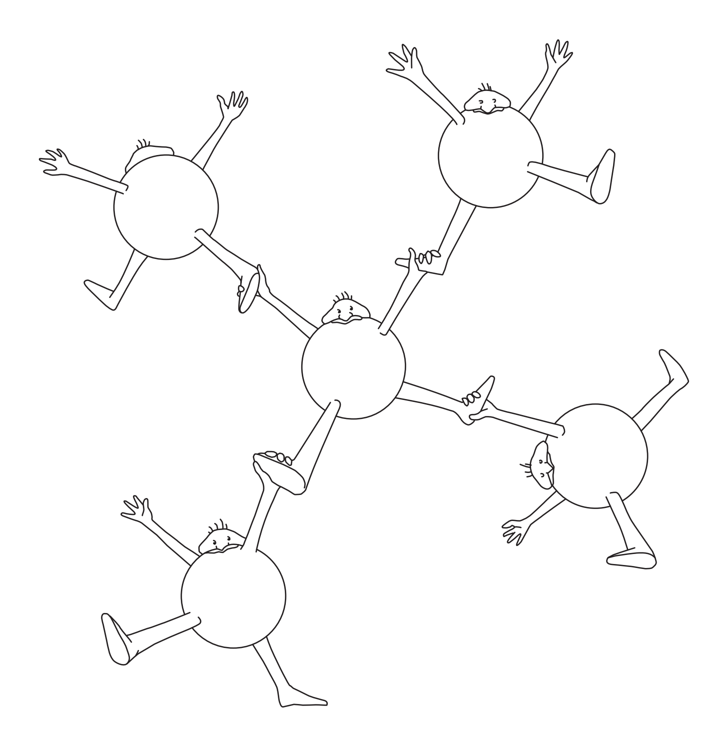
يحدث بعضٌ من أعجب القصص التي تحكيها الجزيئات في الكائنات الحية، ولكن لسوء الحظ أنها يمكن أن تكون صعبة الفهم؛ فكثير من الكلمات تكون طويلة وغير مألوفة، فتكون الجمل المكونة منها غامضة. لا ينفك الكيميائيون يخترعون كلمات جزيئية جديدة فتزداد اللغة اتساعًا، وبعض هذه الألفاظ الجديدة يكون فيها شيء من الطرافة، وبعضها يتيح لنا أن نحكي حكايات لم نكن لنستطيع صياغتها قبل اختراع «الكلمة» المعنية. وفي حالات أخرى، تسمح لنا «الكلمة» الجديدة بأن ننقل بطريقة بسيطة معنًى معينًا كان يتم نقله سابقًا بطريقة ملتوية.

وإنه لَأمرٌ رائع أن يتلاءم المجاز اللغوي مع العالم الجزيئي. ونحن نسمع اليوم كثيرًا عن «لغة الجينات»، وآمل أن أوضح أن هذه مجرد واحدة من اللغات التي تتضمنها الجزيئات. إلا أن ما أقوله يتجاوز كونه مجازًا لغويًّا وحسب؛ إذ توجد بالفعل «معلومات» داخل الجزيئات، تمامًا مثلما توجد معلومات داخل الكلمات، وسأوضح هذا في الفصل السابع.

بالإضافة إلى هذا، فإن استخدام نموذج على أساس معلوماتي لشرح العلوم الجزيئية يُعد أمرًا مهمًّا بحيث يدعو إلى وجود شرح سريع الاستجابة على أساس حواري، بدلًا من الأسلوب الآلي الذي كان متبعًا ومؤيدًا في الأزمان الماضية. يتحدث علماء البيولوجيا الخلوية بشكل متزايد عن جزيئات بروتينية «يتكلم» بعضها مع بعض، كما يتحدث علماء الفيزياء المهتمون بعلوم المادة عن وجود سلوك «تعاوني» و«جماعي» للجزيئات، وهذه ليست تصورات خيالية حمقاء غامضة مقصودًا بها أن تبدو العلوم محببة أكثر للناس (وإن كان هذا التأثير في حد ذاته ليس ضارًّا)، وإنما هم يتحدثون عن الإدراك المتزايد لذلك الرقي البهي والتعقيد الجميل للسلوك الجزيئي، الذي يكون جماعيًّا بصفة عامة ونادرًا ما يسير على نحو خَطِّيٍّ.

واضعًا هذه الأفكار في ذهني، أحتاج أن أتوسع في استخدام الأسلوب المجازي في العلم الجزيئي، ولا غنى لنا عن هذا الأمر، حتى على مستوى الحديث بين أحد المتخصصين

وزميل له. هذا الأمر ينطبق على مجالات أخرى كثيرة من العلوم، ولكن يصل إلى أقصاه في علم الكيمياء؛ إذ تتسم الجزيئات بصفات شبه بشرية، ولا مدعاة للاعتذار عن هذا الأمر! إن هذه الجزيئات أشياء غير مألوفة، وتحتاج لأن نجد طرقًا للتخفيف من هذا الأمر. لقد أصر ناشرو كتابي عن الماء، عن حق، على عدم استخدام نماذج الكرة والعصا لجزيئات الماء عند مخاطبة القارئ العادي غير المتخصص في الكيمياء؛ وذلك ضمانًا لبقاء الكتاب على الرف. ومع ذلك ليس بوسعي تفسير غرابة سلوك الماء دون أن أُظهر تركيبته؛ ومن ثم رسمت الجزيئات في هيئة شياطين صغيرة (شكل ١-٣).



شكل ١-٣: إنَّ جَعْل الجزيئات تبدو في صورة بشرية يمكن أن يفيد في رؤية كيفية تفاعلها فيما بينها. وفي هذا الشكل أُظهر «مسكات الأيدي» الضعيفة التي توجد فيما بين جزيئات الماء.

آمل أن هذا الأمر لم يكن ضارًّا، ولكن ذكَّرني البعض بهذه الأخطار في محاضرة عامة حضرتُها مؤخرًا عن التضاعف الجزيئي، وكان أول سؤال من الحاضرين في القاعة هو: «هل هذه الجزيئات واعية؟» مع اعتبار أن المتحدث كان يتكلم عن منظومة جزيئية تخليقية تُحاكِي (بطريقة بدائية جدًّا) بعضَ خصائص الكائنات الحية، فإنني أفترض أن هذا كان تساؤلًا يمكن تفهُّمُه، وأعتقد بالفعل أن الإجابة هي «لا»، لو أراد المرء أن يحافظ على أي تعريف فعَّال ذي معنًى لذلك المفهوم الغامض لكلمة «الوعي». ولكن بمجرد أن نبدأ في إضفاء الصفات البشرية على الجزيئات، فإننا نستدعي عددًا من المعاني ذات الصلة، وقد يكون هذا أمرًا مفيدًا وقد لا يكون. كثير من الناس يرفضون مفهوم «الجينات الأنانية» على سبيل المثال؛ لأنه يحمل مضامين أخلاقية. (يطلق ريتشارد دوكنز على هذا اسم «العلم الشعري»، ويمكنني إدراك ما يعنيه بهذا، ولكن الحالة الشعرية في تلك الآلية قد تتكدر بفعل رداءة ذلك المجاز، كما يراه البعض.) إن فكرة «تعاوُن» الجزيئات و«تواصُلها» ليست أساسًا لأي فلسفة طبيعية، ولكن من المعقول أن نخمِّن أنه في العلوم الجزيئية على الأقل قد يؤدي منظور العالم الأوتوماتيكي الخطي في النهاية إلى جَعْلنا نبدو مثل الفلكيين القدامى الذين كانوا يُؤَوِّلون حركات الأجرام السماوية من منظور مركزي أرضي؛ محاولين إقحام الملاحظات في قالب غير سليم.

الشكل والحجم

تعتبر رواية «المفتاح الإنجليزي» لبريمو ليفي واحدة من الروايات القليلة التي يمكنني تذكرها التي تتضمن رسمًا لأحد الجزيئات (شكل ١-٤)، وهو جزيء معقد بشكل مخيف، ولن أحلم بعرضه في كتاب غير تكنولوجي عن العلوم، لو كانت نيَّتي هي تثقيف الناس.

ولكن ليفي يفعل هذا لأنه لا يريدنا أن نفهم عن الجزيء إلا شيئًا واحدًا: هو أن للجزيء شكلًا وتركيبة. ثمة بعض الأشكال السداسية (الحلقية) في هذا الجزيء، وبعض الوحدات المستقيمة التي تربطها معًا. ويتحدث الراوي إلى عامل إنشاءات يسمَّى فاوسون، وهو رجل يقوم بتجميع العوارض المعدنية في الجسور، قائلًا:

> إن المهنة التي درستها في المدرسة، والتي أبقتني على قيد الحياة حتى الآن، هي مهنة الكيميائي. لا أعرف إن كانت لديك فكرة واضحة عنها، ولكنها تشبه مهنتك قليلًا؛ كل ما هنالك أننا نركِّب إنشاءات دقيقة ونفكِّكها ... طالما كنتُ

كيميائي تركيبات؛ واحدًا من أولئك الذين يصنعون المركَّبات التخليقية، أي الذين يبنون التراكيب حسب الطلب.

شكل ١-٤: الجزيء الموضح في كتاب بريمو ليفي.

وسوف نصادف في هذه الصفحات أمثلة لجزيئات يمكن أن نعتبرها بمنزلة تماثيل مصغرة وحاويات وكرات قدم وخيوط وحلقات وروافع وخطاطيف؛ كلها صُنعت بإلصاق الذرات معًا. كان أفلاطون يعتقد أن الذرات لها أشكال متعددة السطوح المنتظمة؛ مثل: المكعبات ورباعيات السطوح، وثُمانيات السطوح ... إلخ. كان أفلاطون مخطئًا،[٢] ولكن بوسع الكيميائيين أن يرتِّبوا الذرات في جزيئات بهذه الأشكال.

ما هو إذن حجمُ هذا الجزيء الذي رسمه راوي ليفي لـ «فاوسون»؟ إن كل حرف من حروف الـ C والـ N ... إلخ تمثِّل ذرة، وهي شيء دقيق حقًّا. توجد تشبيهات لا حصر لها توصل المقياس الدقيق للذرات، ولكنني على يقين من أن أهم انطباع ملموس تمنحه هذه التشبيهات هو أن تلك الدقائق المتناهية الصغر من العناصر تعتبر صغيرة جدًّا جدًّا بحق؛ على سبيل المثال: لو استطعنا نفخ كرة جولف وزيادة حجمها إلى حجم الكرة الأرضية،

فستكون كل ذرة من ذراتها في حجم كرة الجولف الأصلية، ولو وضعنا عشرة ملايين ذرة من الكربون جنبًا إلى جنب، فستكوِّن صفًّا طوله حوالي ملِّيمتر واحد.

لا يزيد عرض جزيء صغير مثل جزيء الماء عن ذرات قليلة، وهو حوالي ثلاثة أعشار النانومتر (علمًا بأن النانومتر يساوي واحدًا على مليون من الملِّيمتر)، أما الجزيء المذكور في كتاب بريمو ليفي فهو أكبر من جزيء الماء بمرات عدة (ولا يمكن أن يحدد المرء عدد تلك المرات بالضبط؛ لأن ما رسمه ليفي كان مجرد قطعة من الجزيء، الذي يستمر طوله إلى يمين الصفحة ويسارها).

من تبعات ذلك المقياس الصغير للجزيئات أن الأشياء تَحْدث بسرعة كبيرة للغاية في عالم الجزيئات. وحين نسمع أن الجزيئات يمكن أن تدور عشرة مليارات مرة في الثانية، نتخيل أنها بالتأكيد تدور بسرعات تفوق الخيال، إلا أن الجزيئات صغيرة جدًّا لدرجة أنها حتى لو تحركت بسرعات معتدلة نسبيًّا، يمكنها أن تقطع مسافات قياسية جزيئيًّا في لحظة واحدة؛ فتحتاج ذرات جزيء الأكسجين لأنْ تتحرك بسرعة حوالي متر في الثانية لتكمل عشرة مليارات دورة في الثانية!

ماذا عن العصي التي تربط الذرات معًا؟ في الواقع إنها لا تشغل أي حيز، فهي مجرد بدعة لتساعدنا في إدراك ما يجري في الرسم البياني؛ فالذرات التي ترتبط معًا في جزيئات تحتشد متلاصقةً بعضها بجوار بعضٍ بإحكام، وفي الواقع إنها تتراكب معًا مثل فقاعتَي صابون ملتصقتين. وهذا أمر ممكن؛ لأن الذرَّات ليست مثل كرات البلياردو الصلبة، ولكنها تشبه بدرجة أكبر الكراتِ المطاطيةَ. لدى كل ذرَّة مركز يتصف بالكثافة والصلابة ويسمى النواة، وهي أصغر بحوالي عشرة آلاف مرة من الذرَّة نفسها، وهذا برغم أن تلك النواة هي التي تتركز فيها كل كتلة الذرة تقريبًا، وهي مشحونة بشحنة كهربائية موجبة. يحيط بالنواة سحابة من الإلكترونات، وهي دقائق ذرية ثانوية صغيرة وخفيفة، ومشحونة بشحنة سالبة. ويمكن أن تتداخل سحابتان إلكترونيتان لذرتين دون خطر من تصادم الإلكترونات، وحينئذٍ تتشارك الذرتان في بعضٍ من إلكتروناتهما؛ وهكذا تندمج السحابتان في سحابة واحدة تطوِّق كلتا النواتين، وحالما يحدث هذا، يقال إن الذرتين ارتبطتا في «رابطة تساهمية». وتمثل العصي المبينة في الشكل التوضيحي الجزيئي (شكل ١-٤) الروابط التساهمية، وهي مجرد وسيلة تساعدنا على معرفة أيُّ الذرات يرتبط بأيٍّ منها.

هنا نصل إلى أحد الاعتبارات المهمة عند التحدث عن الجزيئات؛ وهو اعتبار يعقِّد الأمر كله، ويقضي بأنه لا توجد طريقة «مُثلى» لرسم تلك الجزيئات. وقد يقول قائل: حسنًا،

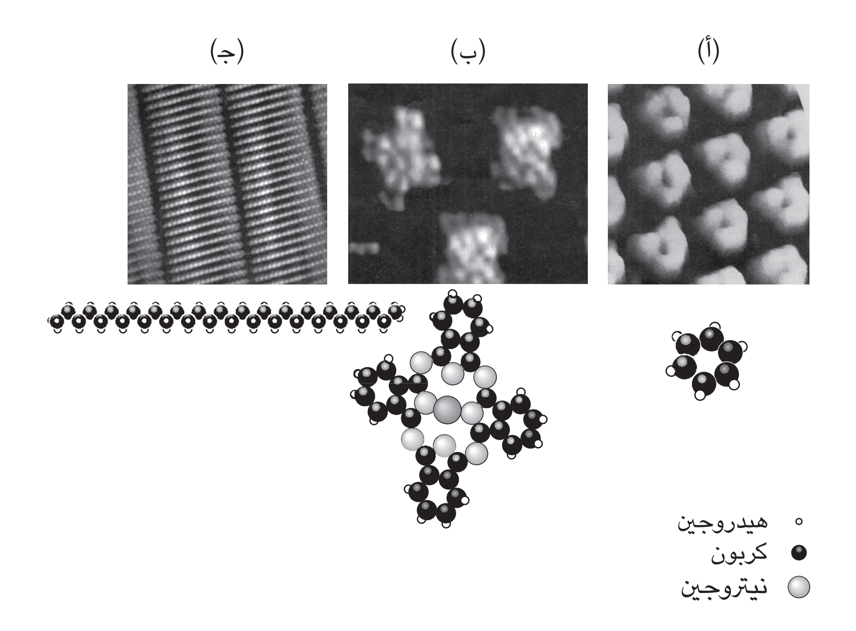
لا تهتم بالأشكال التخطيطية، لماذا لا تُظهِر الجزيئات بشكلها «الحقيقي»؟ بيد أن هذا أمر مستحيل؛ إذ لا توجد طريقة لالتقاط صورة فوتوغرافية لجزيءٍ ما بنفس طريقة التقاطنا لصورة قط أو شجرة. وليست المسألة راجعة إلى صعوبات تكنولوجية وحسب، فليست المشكلة أننا نفتقر في الوقت الحاضر إلى مجهر أكبر أو كاميرا يمكنها استكشاف تلك الأشياء الصغيرة، بل الواقع هو أن آليات الرؤية تجعل من المستحيل أن «نرى» جزيئًا (أو ذرة) على «حقيقته» الواقعية.

السبب هو أننا نرى بالضوء المرئي، الذي هو إشعاع شبه موجي يتفاوت طول موجته — وهي المسافة بين القمم الموجية المتتابعة — من حوالي ٧٠٠ نانومتر للضوء الأحمر إلى ٤٠٠ نانومتر للضوء البنفسجي. بتعبير آخر، يحشد الضوء الأحمر حوالي ١٤٠ ألف تموُّج في السنتيمتر الواحد. وهذا الطول الموجي أكبر بمئات المرات من الجزيء. وبطريقة تقريبية نقول إن الضوء لا يمكن تركيزه في بؤرة أصغر من طول موجته؛ مما يعني أن الأشياء الأصغر من ذلك لا يمكن استيضاحها،[٣] ولا يوجد مجهر ضوئي يمكنه أن يُظهر لنا صورة واضحة لجزيء الماء.

أظن أن هذا من الأسباب التي جعلت الناس يجدون صعوبة في فَهْم كُنْهِ الجزيئات، وجعلت رسومًا توضيحية — كالرسم المبيَّن أعلاه — تنفِّر القراء من كتب العلوم. ويبدو من السخف أن نتحدث بصورة ملموسة عن جسيمات لا تقتصر على كونها أدق من أن تُرى عمليًّا، بل إنها كذلك أَدقُّ من أن تُرى من حيث المبدأ. والأشياء التي لا يمكن رؤيتها تكتسب هالة من الخيال، وكأنها مجرد خرافة وأوهام.

لكنْ ليست الجزيئات ضربًا من الأوهام، وليس يمكننا أن نثبت أنها موجودة وحسب، بل وأنَّ لها أشكالًا وأحجامًا محددة. ويُظهر الشكل (١-٥) بعض صور الجزيئات التي تم التقاطها بمجهر من نوع خاص لا يَستخدم الضوء في تكوين الصور. وقد وضعتُ بجوار كل لقطة رسمًا توضيحيًّا لتركيبة الجزيء. قبل اختراع هذا النمط من المجاهر بوقت غير قصير كان معروفًا أن الجزيئات لديها هذه التراكيب، ولكن لم يكن أي شخص قد رآها مباشرة، وصحيح أن هذه الصور غير واضحة — فليس بإمكانك أن تخمن الشكل المحدد للجزيئات من هذه الصور وحدها — إلا أن الأشكال التي تُرى بالمجهر تتفق بطريقة مقنعة مع تلك المتوقَّعة.

والسؤال الآن: كيف كنا نعرف بالفعل أشكال هذه الجزيئات من قبلِ التقاط تلك الصور؟ إن بعض الأدلة المؤكدة أدلة تجريبية. فحتى رغم أن الجزيئات صغيرة جدًّا



شكل ١-٥: جزيئات تم تصويرها بالمجهر النفقي المسحي الذي بإمكانه أن يوضحها مفردة، كلًّا على حدة، ولكن لا يستطيع ذلك المجهر حتى الآن أن يُظهر تفاصيل كافية تتيح لنا أن نفسر الصور دون معرفة سابقة.

وأصغر من أن يمكن استيضاحها بالضوء المرئي، فمن الممكن «رؤيتها» بإشعاع له طول موجي يساوي حوالي عُشر النانومتر، وهو ما يناظر الأشعة السينية، وعن طريق جعل الأشعة السينية ترتد عن البلورات، من الممكن أن نستنتج أماكن وجود الذرات الداخلة في تركيبها؛ هذا يعني أنه إذا أمكن جَعْل مادةٍ ما في صورة بلُّورية، مع تكدس جزيئاتها بطريقة منظمة، فهذه التكنولوجيا التي تسمى التصوير البلوري بالأشعة السينية، يمكنها أن تُمِيطَ اللثام عن بِنية الجزيئات.

من الناحية النظرية، يجب أن نكون قادرين على رؤية الجزيئات المفردة بمجهر الأشعة السينية الذي يركِّز الأشعة السينية كما نركِّز نحن الضوء في المجهر البصري العادي. لكن عمليًّا يكون من الصعب جدًّا أن نركز الأشعة السينية رغم أن العلماء على

وشك التمكن من عمل ذلك. في الوقت الحالي يمكننا الاكتفاء باستخدام المجهر الإلكتروني؛ حيث يجري إمرار حزمة من الإلكترونات لترتدَّ عن العينة، ويتم تركيزها في بؤرة لصنع صورة. ويمكن أن تعمل الإلكترونات كموجات أيضًا، وباستخدام الموجات الإلكترونية يمكننا أن نصنع صورًا لجزيئات كبيرة جدًّا (نسبيًّا) مثل البروتينات أو الدِّي إن إيه. هذه الصور ليست تفصيلية بدرجة تكفي لإظهار الذرات المفردة، ولكنها تعطي انطباعًا بالشكل العام للجزيئات.

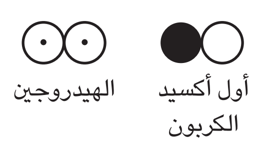
ثمة طريقة أخرى نستدل بها على أشكال الجزيئات، وهي طريقة نظرية؛ إذ من الممكن أن نحسب حجمها. هذا يُدخلنا في «علم الجبر» المتعلق «بنظرية الجزيئات» التي تحدَّث عنها فلان أوبريان، ولكن لا حاجة بنا لأن نشرحها هنا، ويكفي أن نقول إن قوانين ميكانيكا الكم[٤] تمكِّننا من أن نتنبأ بأي الذرات ستكوِّن روابط، وأين ستستقر بعد تكوين الروابط بنسبةٍ بعضها إلى بعض. لا يوجد شيء عشوائي فيما يتعلق بطريقة ارتباط تلك الذرات معًا. وعلى الأخص أقول إن ذرات كل عنصر يكون لها ميل لتكوين عدد ثابت من الروابط، وهذا يسمى «التكافؤ» الخاص بها؛ فذرات الكربون تفضِّل تكوين أربع روابط، وذرات الهيدروجين تكوِّن رابطة واحدة فقط، بينما تكوِّن ذرات الأكسجين رابطتين.

تعتبر نظرية الكم عن البنية الجزيئية نظرية معقدة جدًّا، وحتى أفضل أجهزة الكمبيوتر لا يمكنه حل معادلاتها إلا بصورة تقريبية، ولكن من الممكن حاليًّا تقدير تراكيب الجزيئات المتوسطة الحجم بدرجة معقولة من الثقة. وتُظهر المقارنةُ بين التكهنات المتعلقة بتراكيب الجزيئات وبين تلك التراكيب التي تم التوصل إليها باستخدام التصوير البلوري بالأشعة السينية؛ توافقًا جيدًا، إلا أنه حتى الآن لا توجد طريقة مُرْضية للتكهن بأشكال كثيرٍ من الجزيئات الكبيرة التي توجد في الخلايا الحية. وفي هذه الحالات تصير طريقة التصوير البلوري بالأشعة السينية صعبة أيضًا؛ إذ من الصعب أن نفكَّ نمط الأشعة السينية المرتدة عن بلورة تحتوي على تلك الجزيئات، وأيضًا لأنه في حالات كثيرة تستعصي تلك الجزيئات على تكوين بلورات على الإطلاق. إن الخلايا الحية مليئة بالجزيئات التي لا نعرف أشكالها.

إنها عقبة كَئُودٌ تمنعنا من فهم كيفية أداء جزيئات الحياة لوظائفها؛ هذا لأن شكل الجزيء هو مفتاح سلوكه. وعلى العكس من شعار المصممين، نقول إنه في حالتنا هذه، الوظيفةُ تتبع الشكل.

ومن ثم فإن العلم الجزيئي علم بصري على مستوًى عالٍ، وقد أمضى الكيميائيون ما يربو على مائتي عام في استحداث لغات مصورة لوصف أعمالهم، وكانت النتيجة أنهم

قادرون على استخدام لغات متعددة في الوصف. ثمة طرق كثيرة مختلفة لرسم الجزيئات، وكلٌّ منها تم استحداثه لإظهار الجانب المعين الذي يريد الرسام التركيز عليه. ولقد بدأ الكيميائي الإنجليزي جون دالتون في عام ١٨٠٠ برسم الجزيئات كمجموعات من رموز دائرية تصوِّر الذرات، مع زخرفة كلٍّ منها بالتظليل أو العلامات لتحديد العنصر المَعْنِيِّ. وتتميز هذه الرسوم بالوضوح؛ إذ يسهل فَهْمها بمجرد أن تُعرف شفرتها (شكل ١-٦).



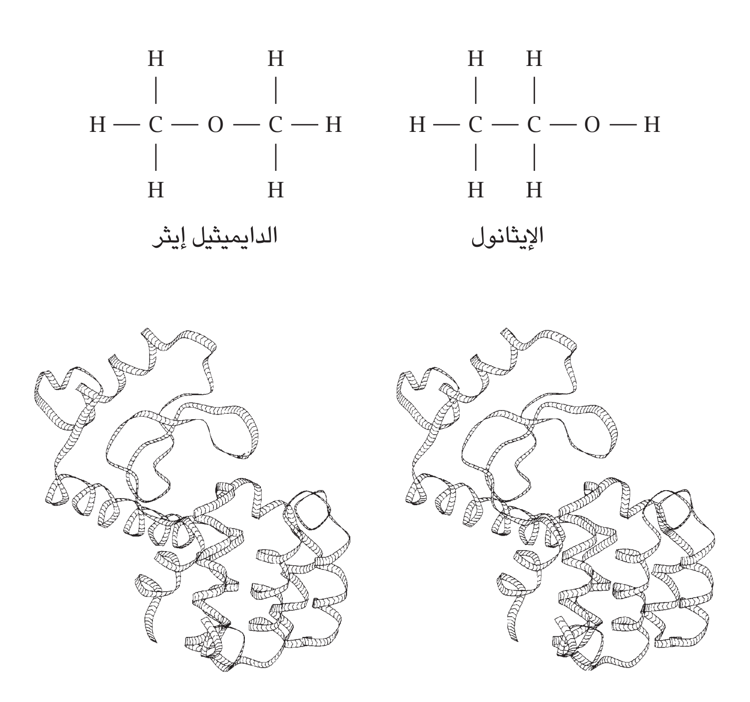
شكل ١-٦: جزيئات دالتون.

هذا أمر طيب، ولكنه لم يكن سهلًا لطابع الكتاب، الذي تَعيَّن عليه أن يخترع هذه الرموز بصفة خاصة. وعلى سبيل الاختصار الأنيق، أُعطيَ كل عنصر رمزًا مكونًا من حرف أو اثنين: C للكربون، O للأكسجين، Ca للكالسيوم، Fe للحديد (لأن الكيميائيين كانت لهم نزعات كلاسيكية حتى في القرن التاسع عشر، فقد اختاروا تدوين اسم الحديد باسمه القديم وهو ferrum، والذهب aurum اختصر إلى Au والفضة argentum اختُصرت إلى Ag بنفس الطريقة، أما العنصر Ir فهو ليس الحديد Iron، وإنما هو عنصر الإيريديوم Iridium. ولكن على الأقل كان المقصود أن تكون هذه المنظومة واضحة في ذاتها).

وهكذا فإن رمز أول أكسيد الكربون هو Co فحسب. ويتم الإشارة إلى عدد الذرات في نفس العنصر بوضع رقم سفلي؛ ومن ثم يكون جزيء الهيدروجين هو H_2، على سبيل المثال.

إلا أن هذا النظام لا يقدم تعبيرًا متفردًا عن جميع الجزيئات أيًّا كانت، وكمثال نقول إن الدايميثيل إيثر والإيثانول (الكحول الإيثيلي) مادتان مختلفتان لهما خصائص مختلفة، إلا أن كلًّا منهما يمكن التعبير عنه بالصيغة الكيميائية C_2H_6O. وهكذا نعود إلى المشكلة المعجمية؛ إذ لا يقتصر تحديد معنى أي كلمة على الحروف التي تتضمنها، ولكن يتضمن ترتيب هذه الحروف كذلك.

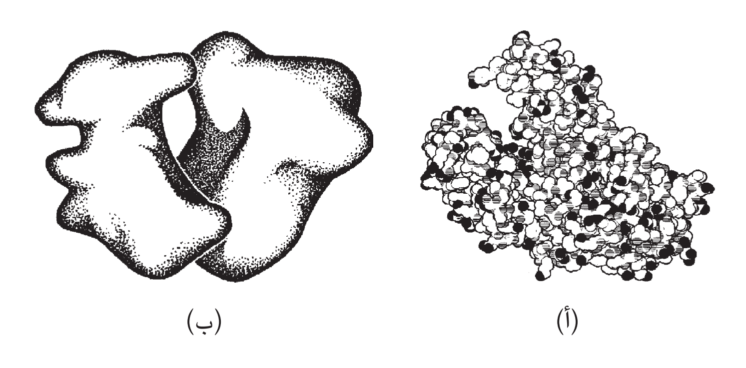
ومن ثَم، هناك حاجة إلى «شكليةٍ» ما تُظهر كيفية ارتباط الذرات معًا. ومن ثَم تأتي أهمية العصيِّ، التي تمثل الروابط. ويمكن تمثيل نسختَي الـ C_2H_6O اللتين تعتبران من الأيسومرات (جزيئات لها نفس المكونات ولكن بترتيب مختلف) بهذه الكيفية:



شكل ١-٧: هاتان الصورتان المجسمتان تتيحان رؤية الأشكال الجزيئية في ثلاثة أبعاد. والجزيء المبين هنا هو شكل من أشكال إنزيم اللايسوزيم، الذي يوجد في اللعاب، وتظهر هنا بوضوح أجزاء ملتوية (ملتفة) من السلسلة البروتينية. ضع الصفحة على مسافة حوالي ٢٠ سنتيمترًا من عينيك، واجعل عينيك تَحْوَلَّان قليلًا بحيث يمكنك أن ترى ثلاث صور، ثم ركز على الصورة الوسطى، وفي ثوانٍ معدودة ستصير شديدة الوضوح.

ثمة تعقيد آخر، وهو أن الجزيء لا يشغل بُعْدين فقط، البعدين العاديين لصفحةٍ ما، وإنما يحتل الأبعاد المكانية الثلاثة كلها.

وهناك طرق مختلفة لإدخال البعد الثالث، وقد صارت أكثر تعقيدًا مع اختراع الرسم البياني بالكمبيوتر. ويُظهر الشكل (١-٧) تمثيلًا مجسمًا لجزيء متوسط الحجم، ويمكنك بالتمرس أن تجعل الصورتين تتراكبان؛ فترى الشكل ثلاثي الأبعاد.



شكل ١-٨: (أ) تُظهر التمثيلات المكانية للجزيئات كيفيةَ شَغْلها حيزًا مكانيًّا. الجزيء المبين هنا هو جزيء إنزيم يسمى بوليميراز الدِّي إن إيه، الذي يعمل على بناء جزيئات دي إن إيه جديدة. والتظليل المبين يميز أنواعًا مختلفة من الذرات. (ب) إن المعرفة الناقصة بالبنية الذرية بمقاييسها الدقيقة، أو مجرد الرغبة في تجنب تفاصيل كثيرة جدًّا، يمكن أحيانًا أن تحتم عمل رسوم تكون تقريبية مختصرة. في هذه الصورة أَعرِض مركَّب الريبوسوم الذي يُنشئ بروتينات جديدة.

هذا على أي حال لا يستنفد الأشكال البيانية التي ابتكرها الكيميائيون، وأحيانًا ما تكون ثمة حاجة لعمل نماذج فراغية تكشف عن عظم الحجم المكاني الذي يشغله الجزيء (شكل ١-٨أ)، وأحيانًا تكون الرسوم البيانية المرتجلة المبسطة أفضل تجنبًا لإظهار التفاصيل غير الضرورية (شكل ١-٨ب).

صنع الجزيئات

إن الجزيئات التي تظهر في (شكل ١-٨) جزيئات بيولوجية؛ وهي تركيبات رائعة، ثابرت الآليات الخلوية على تركيبها، بحيث تستقر كل ذرة في مكانها الصحيح. ولم يستطع الكيميائيون حتى الآن التوصل إلى هذا المستوى من البراعة الفنية، وهذا يجعل للطبيعة اليد العليا. أما الجزيئات التي نصطنعها لقتل البكتيريا المسببة للأمراض، أو مكافحة الفيروسات، أو تدمير الخلايا السرطانية؛ فغالبًا ما تقوم بمهمتها بشكل فج غير بارع. صحيح أنها تعمل بشكل جيد غالبًا ولكنها قد تدمر خلايا سليمة أثناء عملها، أو قد يجد الكائن الضار، الذي غزا الجسم، سريعًا وسيلةً للاحتيال عليها؛ فالبكتيريا — على سبيل

المثال — تجد طرقًا لاكتساب مناعة من المضادات الحيوية. ولكن الكيميائيين في المقابل يتحسنون سريعًا في مجال بناء الجزيئات ببراعة، وليس من الكثير علينا أن نأمل أن يأتي يوم تكون فيه العلاجات بالعقاقير خالية من الآثار الجانبية، وتكون مضمونة النجاح.

وقد عبر بريمو ليفي عن الأمر كما يلي:

> في نهاية المطاف، نحن لا نجيد عملية التجميع. ونحن في الواقع مثل أفيال أُعطيت صندوقًا مغلقًا يحتوي على كل الأجزاء المفككة من ساعة مثلًا؛ فنحن شديدو القوة والصبر، ونهز الصندوق في كل اتجاه بكل قوتنا. بل ربما نسخِّن الصندوق؛ لأن التسخين وسيلة أخرى للهز. حسنًا، في بعض الحالات، إذا لم تكن الساعةُ شديدةَ التعقيد، أو إذا استَمْرَرْنا في رج الصندوق، فقد ننجح في لمِّ شمل أجزائها …

هذا في الحقيقة سيناريو يدعو للتشاؤم. كتب ليفي هذا في عام ١٩٧٨، وقد تغيرت الأحوال في خلال هذه الفترة الطويلة. إلا أنه حتى حلول العقود القليلة الأخيرة من القرن العشرين كان الأسلوب الذي وصف ليفي، والذي يروق للكيميائيين أن يسموه بأسلوب «الهز والخبز»، هو أفضل ما كان بإمكانهم فعله. ومعظم الجهد المبذول في مجال الكيمياء التخليقية مكرس لصنع ما يسمى الجزيئات العضوية؛ بما يعني أن لها تراكيب هيكلية مبنية بالأساس من ذرات كربونية. أغلب الجزيئات التي عرضتها في الكتاب حتى الآن جزيئات عضوية. في جزيئَي الدايميثيل إيثر والإيثانول يكون الهيكل الكربوني صغيرًا نسبيًّا، أما في جزيء بريمو ليفي (شكل ١-٤) فالهيكل أكثر تعقيدًا، ويمكنك ملاحظة أن ذرات النيتروجين تشكل أيضًا جزءًا من ذلك الهيكل، بينما تعمل ذرة أكسجين كجسر مهم في الدايميثيل إيثر. ليست الجزيئات العضوية بالضرورة مبنية على أساس هياكل مكونة حصريًّا من الكربون، ولكن فقط يغلب عليها هذا العنصر.

قد يكون اختيار كلمة «عضوي» غريبًا بعض الشيء؛ فالجزيئات التي «يتلاعب» بها الكيميائيون العضويون كلها تقريبًا ليست نواتج لكائنات من الطبيعة، وإنما هي منتجات معملية. وهذا المصطلح مصطلح تاريخي، فقد كان علم الكيمياء العضوية في وقتٍ ما في الماضي هو دراسة الجزيئات المشتقة من الكائنات الحية، وهذه من الواضح أنها كربونية أساسًا. لكن لماذا الكربون بالذات؟ لأن ذرات الكربون تكاد تكون فريدة بين العناصر من حيث قدرتها على الارتباط معًا في هياكل ثابتة لها أشكال معقدة من حلقات وسلاسل طويلة، وشبكات متفرعة.

لم يكن لدى كيميائيي القرن التاسع عشر إلا القليل من الإدراك لكيفية صنع جزيئات عضوية جديدة. كانوا يستطيعون تعديل الجزيئات التي تقدمها الطبيعة، مع تفتيت بعض الأجزاء عن الهيكل الكربوني وإبدال أجزاء أخرى بها، ولكن تغيير الهيكل نفسه كان أكثر صعوبة عليهم. وكانت المشكلة أكثر صعوبة بسبب أنه لم تكن لديهم سوى فكرة بسيطة عن التراكيب الحقيقية للجزيئات التي أرادوا صنعها، ومن قبيل العجب أن طرق «الهز والخبز» أتت بثمار لا بأس بها، وأمدتنا بأوائل المنتجات التخليقية من البلاستيك والأصباغ والعقاقير.

وإذا بدأنا من حيث بدأ بعض أولئك الكيميائيين، يمكننا أن نرى حقيقةَ عمليةِ بناء الجزيئات، وسبب صعوبتها الشديدة، وسبب رغبتنا الشديدة في بنائها. في منتصف خمسينيات القرن التاسع عشر، كان الكيميائي الألماني أوجست فلهلم هوفمان يعمل في لندن، ووجَّهَ تلميذَه النجيب ويليام بيركن، الذي كان في سن المراهقة، إلى صنع مركَّب الكينين من مكونات تقطير قطران الفحم. الكينين مستخلَص طبيعي من شجرة الكينا، وكان يُستخدم في علاج الملاريا، وكان قطران الفحم يتكون كراسب أسود لزج بكميات كبيرة في مصانع الغاز التي أُنشئت في مستهل ذلك القرن في أعقاب استحداث الإضاءة بالغاز. لم يكن الأمر واعدًا، ولكن هوفمان وآخرون اكتشفوا أنه عن طريق تقطير قطران الفحم يمكن أن نفصل منه مركَّبات عضوية عطرية (أروماتية) غنية بالكربون، مثل البنزين والتولوين والزيلين والفينول.

لم يَعرف أحدٌ منهم تراكيب أيٍّ من هذه المركَّبات، ولم يستطع رسمَ أشكال توضيحية بها تلك العصي، كالتي أظهرتها سابقًا، والتي تشير إلى الارتباط بين الذرات، وكان كل ما عرفوه هو مقدار ما تحتويه بعض المركَّبات من كل عنصر من العناصر، ومن ثم صيغتها الكيميائية؛ فالبنزين مثلًا صيغته الكيميائية C_6H_6 والكينين $C_{20}H_{24}N_2O_2$، ولم يكن شكل الهياكل الكربونية في هذه الجزيئات معروفًا بالكامل.

كانت طريقة هوفمان (ومن ثم طريقة بيركن) أن يقدِّر عدد الذرات، وبدأ بمستخلص من قطران الفحم، أمكنهما تحويلُه إلى مركَّب يُسمَّى أليل تولويدين، به أغلب الذرات الصحيحة بالنسب الصحيحة تقريبًا، آملين أن تؤدي بعض المعاملة المناسبة لهذه المادة إلى تحويلها لمادة الكينين. كانا يظنان أن بالإمكان إدماج جزيئين من الألايل تولويدين (وصيغته $C_{10}H_{13}N$) مع بعض الأكسجين والهيدروجين لصنع العقَّار المطلوب. ولكن تعذَّر هذا؛ إذ إن هناك طرقًا كثيرة لربط عشر ذرات من الكربون معًا، والواقع أن الهيكل الكربوني للألايل تولويدين ليس مماثلًا للهيكل الكربوني لنصف جزيء الكينين.

وهكذا فإن التجربة التي أجراها بيركن في معمل تم تجهيزه بمنزل والديه في شرقي لندن لم تنجح، ولكنها أنتجت مادة تشبه الوحل، لونها كلون الصدأ، وهي مألوفة لعلماء الكيمياء العضوية. إلا أن بيركن الشاب المتحمس لم يستسلم، فأعاد التجربة مستخدِمًا مركَّبًا عضويًّا يسمى الأنيلين بدلًا من الألايل تولويدين، وفي هذه المرة كانت المادةُ المُوحِلةُ سوداءَ اللون، ولكن حين أذابها في مذيبات ميثيلية، نَتَجَ عن ذلك لون أرجواني رائع، وابتهج بيركن حين اكتشف أنه يمكن أن يصبغ الحرير. وهكذا اكتشف أول صبغة أنيلين؛ فأنشأ مصنعًا مع أخيه وأبيه لصنع هذه المادة، وسرعان ما تم إنتاجها بكميات كبيرة في بريطانيا وفرنسا. كانت هذه علامة على بداية هذا المجال الذي لم يقتصر على صناعة الأصباغ التخليقية، ولكن اتسع ليشمل كل صناعة الكيميائيات الحديثة، فلقد بدأ الكثير من شركات الكيميائيات المعاصرة مثل باسف وسيبا جايجي وهوشت كمنتجين لأصباغ الأنيلين.

وبحلول الربع الأخير من القرن التاسع عشر صارت أعمال تركيب الجزيئات العضوية أقل عشوائية، وقد استنتج أوجست فريدريش فون كيكوليه في عام ١٨٥٧ أن ذراتِ الكربون رباعيةُ التكافؤ؛ أي إنها تميل لتكوين أربع روابط. وفي عام ١٨٦٥ افترَض أن البنزين، الذي تنتمي إليه جميع جزيئات قطران الفحم الأروماتية، يحتوي على حلقة من ست ذرات من الكربون، وهي فكرة مهيمنة منتشرة في الكيمياء العضوية. وفي عام ١٨٦٨ قام الكيميائيان الألمانيان كارل جريبه وكارل ليبرمان بتركيب جزيء الأليزارين، الذي يُعزى إليه اللون الأحمر للصبغ المستخرج من جذر نبات الفُوَّة. كان هذا من أهم الأصباغ الطبيعية من الناحية التجارية، وقد جعلت عملية التركيب هذه — التي أجراها جريبه وليبرمان — هذا الصبغ الاصطناعي متاحًا بسعر أرخص بكثير من الطبيعي.

يعد تركيب الأليزارين علامةً بارزة على طريق صنع الجزيئات لسببين؛ أولًا: أنه تحقق بتعديل مخطط للمادة البادئة (مركَّب آخر من مركَّبات قطران الفحم الأروماتية يسمى الأنثراسين) بدلًا من طبخ المكونات أملًا في تحقيق أفضل النتائج. كان لدى الكيميائيين بعض المعرفة التي لم تقتصر فقط على الصيغة الكيميائية للأنثراسين، ولكن شملت أيضًا بِنْيته الكيميائية، التي عرفوا أن لها علاقة ببنية الأليزارين. (في الحقيقة لقد خمنوا البنية الخطأ، ولكن لحسن الحظ أنْ تَبيَّن أن هذا الأمر لا أهمية له.) ويُطلِق علماء الكيمياء العضوية على هذا النوع من الإجراءات التي يتحول بمقتضاها جزيء بادئ — بشكل ممنهج وتدريجي — إلى المنتج المطلوب عبارةَ «التخليق المتعقل».

ثانيًا: عن طريق صنع جريبه وليبرمان للأليزارين في المعمل؛ فقد أظهرا أن الكيمياء العضوية قادرة على منافسة إنتاج الطبيعة، فقد صار من الممكن صنع الجزيئات التي نجدها في الكائنات الحية، والتي يسميها الكيميائيون اليوم «المنتجات الطبيعية».

هل كان الصبغ التخليقي الأحمر الذي صنعه جريبه وليبرمان بكمية قليلة، ثم أنتجته مصانع الكيماويات بالأطنان لاحقًا؛ مطابقًا لصبغ نبات الفوة الطبيعي؟ الجواب هو: نعم ولا؛ فالمستخلص الذي يتم الحصول عليه بصورة تقليدية من جذر نبات الفوة هو خليط من مركَّبات عدة مختلفة. والأليزارين هو الجزيء الملوِّن الرئيسي، ولكن الخلاصة تحتوي أيضًا على مركَّب قريب الصلة به اسمه الفرفرين، الذي يتسم باللون البرتقالي (رغم اسمه الذي يعطي في الإنجليزية الانطباع باللون الأرجواني). وقد أنتجت العمليةُ التي حوَّلت الأنثراسين إلى الأليزارين التخليقي أيضًا العديدَ من النواتج الثانوية، وأغلبها جزيئات لها تراكيب مشابهة جدًّا للأليزارين. كان بيركن أحدَ الكيميائيين الذين اكتشفوا في مستهل عقد السبعينيات من القرن التاسع عشر ما لا يقل عن أربعة من النواتج الثانوية في الأليزارين المُنتَج صناعيًّا، وكان هناك الكثير من المنتجات الأخرى، بلا شك، ولكن بكميات أقل.

وهكذا، فبينما كانت جزيئات الأليزارين المنتجة تخليقيًّا مطابقة لتلك المستخرجة من جذر الفوة، فقد كانت مادة الصبغ التخليقية الحقيقية مختلفةً عن الصبغ الطبيعي، وكان الاثنان في صورة غير نقية. وهذا ينطبق فعليًّا على جميع المركَّبات «الطبيعية» التي يتم تخليقها صناعيًّا؛ لأن جميع العمليات التخليقية التي يستخدمها خبراء الكيمياء العضوية تتولد عنها نواتج ثانوية. هذا لا يعني بالضرورة أن الكيماويات التخليقية أفضل أو أسوأ من نظيراتها المستخرجة من مصادر طبيعية؛ فكلتاهما يرجح أن تكونا غير نقيتين بدرجةٍ ما، ولكن الكيميائيين يُثمِّنون النقاء كثيرًا، ويُمْضون وقتًا طويلًا في تخليص منتجاتهم من الشوائب. وعلى النقيض من هذا، فإن الخلاصات الطبيعية هي خلائط معقدة، ما لم تَجرِ معالجتها من أجل فصل مكوناتها.

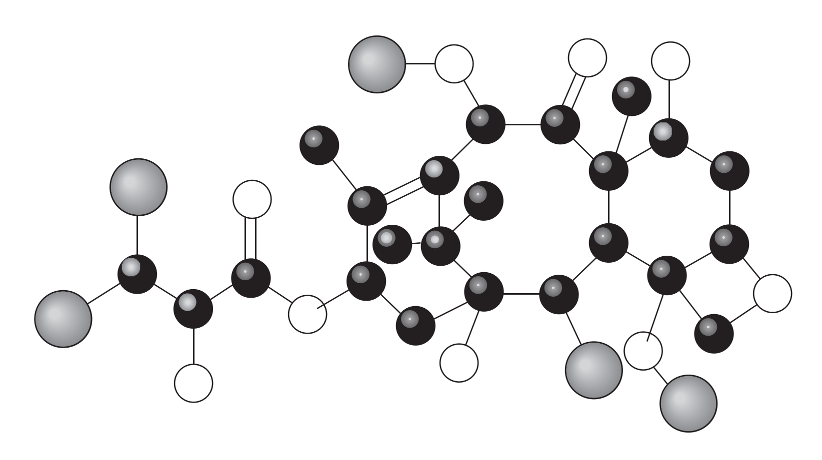
لم تكن القيمة التجارية للمواد المشتقة من مركَّبات قطران الفحم مقتصرة على الأصباغ؛ فقد استخدم بول إرليخ — وهو عالم وطبيب ألماني — الأصباغَ التخليقية الجديدة في عقد السبعينات من القرن التاسع عشر لصبغ الخلايا؛ مما يسهِّل دراستها تحت المجهر. وقد لاحظ أن بعض الأصباغ تقتل الخلايا البكتيرية التي امتصتها، بما يوحي باحتمالات علاجية، وبدأ في تخليق مركَّبات صبغية لاختبارها كعقاقير، وبهذه

الطريقة تَوصَّل في عام ١٩٠٩ إلى صِبْغٍ مُحْتَوٍ على الزرنيخ — يسمى سالفارسان — يمكنه قتل البكتيريا التي تُسبِّب مرض الزهري، وقد كان هذا العقَّار أول علاج حقيقي لذلك المرض القاتل منذ العصور الوسطى التي استُخدم فيها الزئبق، وكانت هذه بداية العلاج الكيميائي الحديث.

وبعد هذا بتسعة عشر عامًا اكتشف ألكسندر فلمنج البنسلين، وهو مركَّب يُنتجه نوع من الفطر، ويقتل البكتيريا. كان هذا أول مضاد حيوي، وقد حقق ثورة في مجال الطب الجراحي بأن قلل كثيرًا قابلية إصابة الجروح بالعدوى. وهناك الكثير من المنتجات الطبيعية الأخرى لها تأثيرات فسيولوجية نافعة؛ فحمض الساليسيليك على سبيل المثال، يُستخلص من لحاء شجرة الصفصاف، ويتميز بخصائص مسكِّنة للآلام ومطهِّرة، كما يوجد جزيء ذو صلة وثيقة به يدخل في تركيب الأسبرين، الذي تنتجه شركة باير الألمانية منذ عام ١٨٩٩. ويواصل الكيميائيون وعلماء الطب التنقيب في ترسانة الجزيئات التي توفرها لهم الطبيعة للحصول على عقاقير فعالة؛ ومن ثم للتوصل إلى طرق لتخليقِ ما يفيد منها.

ومن بين الجزيئات التي اكتسبت شهرة في السنوات الأخيرة ذلك المركَّب المسمَّى باكليتاكسيل، والذي يُعرف أكثر باسمه التجاري «تاكسول». إنه منتج طبيعي من شجر الطقسوس الباسيفيكي، وتَبيَّن في عقد الثمانينات من القرن العشرين أن له فاعلية كبيرة في منع انقسام الخلايا، مما يجعله فعالًا كعامل مضاد للسرطان؛ إذ إن السرطان ناتج عن تكاثرٍ للخلايا خارجٍ عن السيطرة. وقد صدَّقت هيئة الغذاء والدواء الأمريكية عليه كعلاج لسرطان الثدي والرئة والمبيض والبروستاتا. ولكن الطقسوس الباسيفيكي لا يمثل مصدرًا يمكن الركون إليه؛ إذ إن كل شجرة منه لا تُنتج سوى ملِّيجرامات قليلة من المركَّب، ويجب أن يتم استخراجه من اللحاء، وبهذا تموت الشجرة لا محالة. ومن المعلوم أن تلك الشجرة مهددة بالانقراض، ومن الممكن أن تختفي عن الوجود قبل أن يتم الوفاء بالاحتياجات العالمية من التاكسول؛ ومن ثم، فهناك احتياج للتاكسول التخليقي.

جدير بالذكر أن التركيبة الجزيئية للتاكسول شديدةُ التعقيد؛ إذ يتكون هيكله من أربع حلقات من الكربون؛ إحداها بها أربع ذرات، واثنتان ست ذرات، وواحدة ثماني ذرات (شكل ١-٩). تتدلى مجموعات تابعة عديدة من هذا الهيكل، ولا يوجد عامل كيميائي قياسي لدينا له هذا التكوين الهيكلي؛ ومن ثم يجب تخليقه من الصفر.



شكل ١-٩: جزيء التاكسول. أُظْهِرُ هنا العناصرَ الرئيسية فقط من الهيكل الجزيئي، وتُمثِّل الكراتُ السوداءُ ذراتِ الكربون، بينما تُمثِّل البيضاءُ ذراتِ الأكسجين، وتُمثِّل الكراتُ الرماديةُ الأكبرُ حجمًا مجموعاتٍ «بديلةً» تحتوي على الكربون والأكسجين والهيدروجين، وهذه أَغْفَلْتُ إظهارها تفصيلًا. هناك ذرات هيدروجين أخرى في الجزيء أيضًا، وهذه حَذَفْتُها بهدف توضيح الشكل.

يعد هذا تحديًا كبيرًا أمام الكيميائي القائم بالتخليق. ويعطينا وصف بريمو ليفي إشارة إلى الطريق الذي يجب أن يسلكه ممارس الكيمياء العضوية التخليقية، إذ يقول:

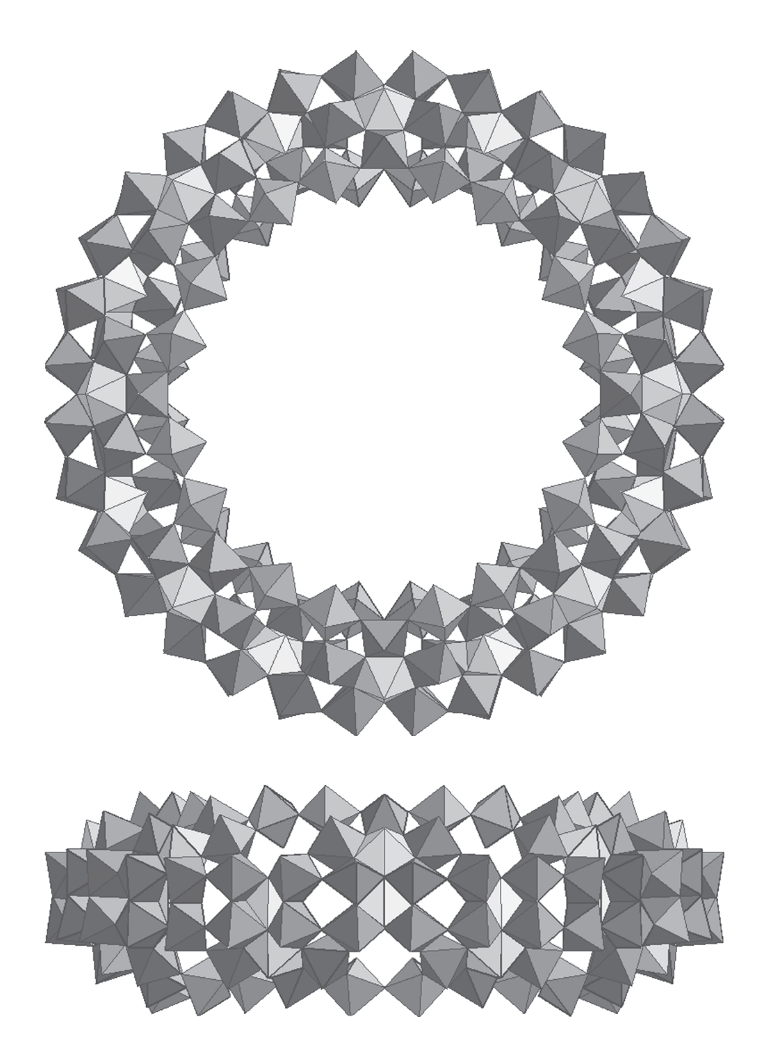
> كما لك أن تتوقع، من المعقول أكثر أن تتقدم قليلًا كل مرة؛ ففي البداية يمكنك ضمُّ قطعتين، ثم إضافة قطعة ثالثة، وهكذا. يحتاج الأمر إلى قدر كبير من الصبر [أكثر من مجرد الهز والخبز]، ولكنك في الواقع ستصل إلى مبتغاك. وفي معظم الأحوال يكون هذا هو أسلوبك المُتبع.

إن عملية تخليقية كهذه يجب أن يتم التخطيط لها بحرص، وأكثرُ طرق هذا التخطيط شيوعًا هو ما ابتكره العالم الأمريكي إلياس جيمس خوري الحائز جائزةَ نوبل،

والذي أسماه: «التحليل التخليقي الارتجاعي»، وكما يدل الاسم فإنك تعمل بشكل ارتدادي من المنتج الذي تم إنهاؤه، وكأنك تعيد تفكيك نموذج من الجزيء. وفي كل خطوة تقوم بتكسير عدد من الروابط حتى يمكنك معرفة كيفية صياغتها؛ ومن ثم، عندما يحين وقت أداء العملية في الاتجاه الطبيعي تكون قد عرفت بالفعل كيفية عمل كل رابطة. تكمن البراعة في إجراء العملية في اتجاهها العكسي وصولًا إلى نقطة البداية من المواد الأولية — أجزاء الهيكل الكربوني — المتاحة لديك، أو التي يمكنك بسهولة تخليقها من مركَّبات متوافرة لديك.

في حالة التاكسول، نجحت مجموعتان في عمل هذا؛ ففي عام ١٩٩٤ تَمكَّن فريق يعمل في معهد سكريبس للأبحاث في كاليفورنيا، يقوده كيه سي نيكولاو، ومجموعة أخرى تعمل تحت إشراف روبرت هولتون في جامعة ولاية فلوريدا، من وصف العمليات التخليقية المتعددة الخطوات بفاصل زمني قدره أسبوع فيما بينهما. لا توجد طريقة فريدة لصنع جزيءٍ ما بهذا التعقيد، كما لا توجد بالفعل طريقة هي «المثلى»؛ فلقد لوحظ ظهور مسالك بديلة عديدة. لكن تظل الطرق كلها شديدةَ التعقيد لدرجة تجعلها لا تصلح للإنتاج الواسع النطاق، وفي الوقت الحالي يتم إنتاج التاكسول بشكل «شبه تخليقي» من مركَّب وسيط يوجد في إبر شجر الطقسوس، الذي هو بمنزلة تاكسول نصف مبني. ويمكن إكمال عملية التخليق بكفاءة عالية نسبيًّا في المعمل، كما يمكن إزالة الإبر دون قتل الشجر.

تحدثتُ هنا عن صنع الجزيئات العضوية، ولكن يجب أن أركز على أن الكثير من الكيميائيين يبنون جزيئات أساسها عناصر أخرى غير الكربون، وهذه تكون غالبًا جزيئات صغيرة نسبيًّا؛ إذ إن العناصر الأخرى لا تكوِّن بنفس السهولة تلك الهياكل الكبيرة المعقدة التي يكوِّنها الكربون. من الاستثناءات البارزة لتلك القاعدة ذلك الجزيء المبيَّن في الشكل (١-١٠)، وهو حلقة أغلبها من ذرات الموليبدنوم والأكسجين. صَنَع هذا الجزيءَ مجموعةُ أخيم مولر في جامعة بيلفلد بألمانيا، ويبلغ قياس عرض ذلك الجزيء أربعة نانومترات (أي أكبر من عرض جزيء الماء بحوالي خمس عشرة مرة، وأصغر من عرض شعرة الإنسان بعشرات الآلاف من المرات). حين تتحد الفلزات مع الأكسجين، فإنها لا تتوقف عادة في منتصف الطريق كما يحدث في حالة الجزيئات الكبيرة؛ بل إما تكوِّن جزيئات من عدد قليل من الذرات، وإما تتبلَّر لتكوِّن مواد صلبة شبة معدنية (يمكنك تسميتها «جزيئات لا نهائية»). ولقد صار الكيميائيون مؤخرًا شديدي الاهتمام بالجزيئات غير



شكل ١-١٠: «عجلة كبيرة» من الجزيئات صنعتها مجموعة أخيم مولر في ألمانيا (من منظور علوي وجانبي). يتكون كل هرم منها من مجموعة من ذرات الموليبدنوم والأكسجين.

العضوية الكبيرة، مثل المبينة هنا؛ لأنها يمكن أن تمتلك خصائص غير عادية، ويمكن أن تكون مفيدة، مثل خاصية المغناطيسية أو التوصيل الكهربائي. تُصنَع مكونات مثل

دوائر الترانزستور في الرقاقات الصغيرة من مواد غير عضوية، أساسًا من السليكون وثاني أكسيد السليكون. وتعتبر المكونات التي يتم تصنيعها حسب الحاجة لحساب تكنولوجيا الإلكترونيات، على المستوى الجزيئي، أحد الأصناف الموضوعة ضمن قائمة عملية التصنيع المعقدة للجزيئات.

هوامش

(١) بعد نهاية الحرب العالمية الثانية، ادَّعت مجموعة من الحلفاء شكَّلها أيزنهاور أنه «لولا شركة آي جي [فاربن] بإمكاناتها الإنتاجية الهائلة وأبحاثها البعيدة المدى وخبرتها التكنولوجية المتباينة وتركيزها بصفة عامة على القدرة الاقتصادية، لَمَا كانت ألمانيا لتصير في وضع يسمح لها أن تبدأ حربها العدوانية في سبتمبر ١٩٣٩.» وإن إحدى شركات آي جي فاربن الفرعية، وتدعى ديجيش، هي التي صنعت غاز الزيكلون بي السام الذي استُخدم في معسكرات الاعتقال.

(٢) في الحقيقة يمكن أن يدافع المرء عن أفلاطون قائلًا إنه لم يكن مخطئًا جدًّا؛ إذ ترتبط الذرات معًا في تشكيلات هندسية محددة، فذرات الكربون — على سبيل المثال — يروق لها أن تستقر في مركز شكل رباعي السطوح مع وجود أربع ذرات أخرى في الأركان. هذا لا يجعلها تلك الكتلةَ الرباعيةَ السطوحِ التي تخيَّلها أفلاطون عن ذرات «النار» تمامًا، ولكنه يظهِر أن وجهة نظر أفلاطون الهندسية عن العالم المجهري كانت تتصف بلمحة من الصواب.

(٣) أتحدث هنا عن المجهر التقليدي؛ حيث يتركز الضوء في بؤرته بواسطة العدسات. ثمة بعض المجاهر البصرية (الضوئية) الجديدة التي تتجاوز هذه القدرة التوضيحية المحددة بالطول الموجي؛ وذلك بجَعْلِ مصدر الضوء يرتفع مقتربًا من العيِّنة المطلوب فحصها، وجَعْلِه يلمع من خلال فتحة دقيقة. هذا يمكن أن يزيد درجة الوضوح إلى حوالي عُشر الطول الموجي.

(٤) ميكانيكا الكم هي التوصيف الرياضي للمادة وسلوكها على مقاييس حجم دقيقة جدًّا، الأبعاد الذرية تحديدًا. وعلى هذا المقياس يمكن أن تُظهر المادة خصائص شبه موجية.

الفصل الثاني

العلامات الحيوية: جزيئات الحياة

إنه لأمر يُشعرني بالراحة حين أرى العلماء والشعراء وقد توصلوا معًا إلى النتائج نفسها. فحين تأمَّل عالِم الأحياء البريطاني جيه بي إس هالدين في عام ١٩٤٩ السؤال: «ما هي الحياة؟» بدأ إجابته في صورة اعتراف قال فيه:

> إنني لا أعتزم الإجابة عن هذا السؤال. فأنا في الحقيقة أشك في إمكانية الإجابة عنه إجابةً وافيةً على الإطلاق؛ لأننا نعرف إحساسنا بأننا أحياء، تمامًا مثلما نعرف ما هو الاحمرار المتوهج، أو ما هو الألم، أو الجهد، ومع ذلك لا يمكننا وصف هذه الأشياء بأي لفظ آخر من الألفاظ.

وكانت إميلي ديكنسون أكثر إيجازًا حين قالت:

> الطبيعة هي ما نعرفه.
> ولكن ليست لدينا المهارة لنقول ما هي.

إلا أن هالدين كان مستعدًّا لأن يغامر قائلًا:

> إن الحياة نمط من العمليات الكيميائية، ولهذا النمط خصائص معينة، ويتمخض عنها نمط مماثل، كما يفعل اللهب، ولكنها تنظم نفسها، وهذا ما لا يفعله اللهب … ومن ثم، حين قلنا إن الحياة نمط من العمليات الكيميائية، فقد قلنا شيئًا حقيقيًّا ومهمًّا … ولكن إذا ادَّعينا أن بإمكان أحد منا أن يصف الحياة بشكل كامل في هذه السطور، فسيكون هذا بمنزلة محاولة لاختزالها في صورة آلية ما، وهذا ما أعتقد أنه ضرب من المستحيل.

هل الحياة مجرد جزيئات تعمل معًا في حالة من التعقيد تتصف بأنها رهيبة ولكنها قابلة للتفسير من حيث المبدأ؟ أم إنها أشد تعقيدًا؟ إننا لا نعرف. يتبنى العلماء نهجًا يبدأ من أسفل ويتجه إلى أعلى؛ إذ يفترضون أبسط الافتراضات ويعملون فقط على الفرضيات القابلة للاختبار. لا نعرف بعدُ إن كان هذا سيؤدي في النهاية إلى نقطة يكون العلم بعدها عاجزًا عن التقدم، لكن لا تبدو أمامنا نقطة كهذه. ويبدو من المحتمل أن الحياة — التي يمكننا أن نعرِّفها بشكل فضفاض على أنها كائن يمكنه أن يتكاثر، وأن يستجيب لبيئته، ويستخلص منها أسباب العيش — مكوَّنةٌ فقط من جزيئات وعلاقات تربط بين هذه الجزيئات. في الحقيقة، يبدو هذا مرجحًا بشدة. ولا يجب أن يفتَّ هذا الأمر في عضدنا، بل على العكس قد يكون رائعًا؛ ففكرة أن حزمة من الجزيئات أنتجت لنا مسرحية «الملك لير» قد تجعل العالم يبدو مكانًا ساحرًا!

ولستُ أظن مع ذلك أن يكون العقل البشري (فضلًا عن العجائب التي يدبرها) قابلًا على الإطلاق لأن «يُفسَّر» من المنظور الجزيئي، تمامًا مثلما لا تُفسَّر مسرحية «الملك لير» من منظور الأبجدية اللغوية وحسب. معظم العلماء لا يعتقدون هذا أيضًا. إن الظواهر الطبيعية متسلسلة هرميًّا على نحو تصاعدي، فلا يمكن فهم جميع الأشياء عن طريق تدبرِ ما يحدث على درجة واحدة منها فقط؛ إذ مهما عرفتُ عن الطريقة التي تعمل بها دوائر الترانزستور، فلن أستطيع أن أستنبط من هذه المعرفة السبب الذي يجعل جهاز الكمبيوتر الخاص بي يتعطل؛ وإذا بذرتُ بذورًا ولم تنبت، فسيكون من الأفضل لي أن أبدأ بالتفكير في المحتوى الغذائي ودرجة الرطوبة والحرارة لتربتي من أن أجري تحليلًا جينيًّا للبذور؛ فالكثير من المهارة العلمية يعتمد على معرفة أين تنظر في ذلك الترتيب التصاعدي؛ ومن ثم معرفة ما هو ذو صلة بك وما هو غير ذلك.

من المهم توضيح تلك النقطة قبل أن نستكشف جزيئات العالم الحي؛ لأن وجهة النظر الجزيئية لعلم الأحياء غالبًا ما تُقَيَّم باعتبارها اختزالية، أي محاوَلة لشرح كل وجهٍ من وجوه الحياة على المستوى الجزيئي للجينات. هذا بحقٍّ يكون في بعض الأحيان أفضل وسيلة للتقدم في هذا المجال؛ فالجزيئات هي على أي حال أصغرُ وحداتٍ عاملةٍ تعتمد عليها الحياة. ولكن إذا سلمنا، كما يفعل معظم العلماء، بأننا عن طريق هبوط سلم الحياة إلى عالم الحياة الدقيقة، يكون علينا أن نغفل مجموعة كاملة من الأسئلة والأجوبة عن الحياة (مثل: ما هو الوعي؟) فحينئذٍ لا يبدو أن هناك شيئًا يثير الاعتراض في هذا الهبوط.

في الحقيقة، أدى هذا السبيل بنا إلى فهمٍ أوضحَ لطبيعتنا الأساسية؛ إذ ساعدتنا البيولوجيا الجزيئية على ملء الفجوة الكبيرة في نظرية تشارلز داروين الثورية؛ وهي قضيةُ آليةِ الانتقاء الطبيعي. كما أنه مَنَحَنَا ولو فكرةً طفيفة عن كيفية ظهور الحياة في عالم الوجود على كوكبٍ من الغازات والصخور والماء، كما أنقذ أرواحًا وخفف الكثير من الآلام والمعاناة، وساعدَنا على فهم السبب في أن الأدوية لا تنجح في كل الحالات كما نتمنى، ولماذا أدى الاستخدام غير المسئول للمضادات الحيوية إلى توليد جراثيم عظيمة الضرر، وكيف يفعل فيروس الإيدز أفعاله الشنيعة. لقد أصبحت دراسة جزيئات الحياةِ العِلمَ الرئيسي في النصف الثاني من القرن العشرين، وتبدو جاهزة لأن يكون لها أثر أكبر في حياتنا في المستقبل، ولربما هي ذلك الحقل من العلم الذي لم يَعُد فيه اكتساب بعض المعرفة نوعًا من الترف.

القوة الحيوية

كانت الكيمياء العضوية في وقتٍ ما تُعتبر شيئًا مختلفًا عن باقي علم الكيمياء؛ إذ كان الكثير من الكيميائيين في بدايات القرن التاسع عشر يؤمنون بأن المادة العضوية هي نتاج قوة حيوية تفعل فعلها في الكائنات الحية، وهذا ما لا يستطيع الكيميائي محاكاته في المعمل على الإطلاق. ولكن مع حلول عام ١٨١٨ رأى الكيميائي السويدي ذو التأثير القوي يونز ياكوب بيرسيليوس أن فكرة القوة الحيوية غير ذات معنًى، وأنها تثير اليأس من أن نتطور إلى ما بعدها، فقال:

> إن السبب وراء معظم الظواهر التي تحدث في داخل الجسم الحيواني يقبع في العمق مختفيًا عن أنظارنا، لدرجة أننا لن نجده بالتأكيد. ونحن نسمي هذا السبب الخفي «القوة الحيوية»، ومثل كثيرين غيرنا ممن كانوا قبلنا — وحاولوا دون جدوى توجيه اهتمامهم الواهم إلى هذه الفكرة — نحن أيضًا نخترع «كلمة» لا يمكننا أن نربط بها أي فكرة.

إلا أنه في نفس الوقت أعطى بيرسيليوس تلميحًا عن كيفية التقدم، فقال:

> إن «قوة الحياة» هذه لا تنتمي إلى الأجزاء المكوِّنة لأجسادنا، ولا هي متأصلة فيها، وهي ليست قوة بسيطة كذلك، ولكنها نتاج العمل التبادلي لأدوات الجسم وبقاياها …

هذا هو المفتاح؛ فلا يتعلق فهم الأساس الجزيئي للحياة كثيرًا بإدراك ماهية الجزيئات، بقدرِ ما يتعلق بما تفعله كلٌّ منها مع غيرها؛ فليست الطبيعة الجزيئية للحياة صالة عرض للتحف، وإنما هي تحفة في حد ذاتها. في الفصول القادمة سأتعرض بالوصف لبعض الخطوات، وأريد هنا أن أقدِّم باختصار بعضًا من الخصائص.

في زمن هالدين، لم يكن من الغريب اعتبار الحياة سلسلة من التحولات الكيميائية التي تجري كأنها في شبكة من الآنية الزجاجية المعملية. وقد آمن العلماء وقتها بأن مفتاح الأمر كله هو الأيض؛ أي كيفية الحصول على الطاقة من الطعام. ولكن لا يمكنك الحصول على كائن كامل عن طريق وضع جميع المكونات الجزيئية المنقَّاة للخلية. في المقابل تهتم وجهة النظر الحديثة عن البيولوجيا الجزيئية بعملية «التنظيم» من حيث الزمان والمكان؛ فكيف تترتب جزيئات الحياة فيما بين أجزاء الخلية؟ وكيف تنتقل هنا وهناك؟ وكيف تتواصل كي تنسِّق أنشطتها؟ يمكننا أن نطرح الآن هذه الأسئلة؛ لأنه أصبح بإمكاننا أن نفحص الخلية الناشطة على المستوى الجزيئي، مع أخذ قياسات ولقطات للجزيئات وهي تعمل؛ وهكذا تصير الخلية مجتمعًا سكانيًّا.

إلا أن هذا المجتمع يتَّسم بالتعقيد الشديد. ليست البيولوجيا الجزيئية في مثل صعوبة الفيزياء النظرية؛ فمفاهيمها ليست غير مألوفة ولا تجريدية ولا عويصة رياضيًّا، وإنما تنشأ الصعوبة من تداخل العديد من العوامل في وقت واحد. إننا نشعر بالدهشة والصدمة حين يصيب خللٌ ما أحوالَ آلياتنا الجزيئية، ولكن ما يثير الدهشة أكثر هو أن تلك الآليات تعمل من الأساس! وهي تمارس عملها لأنها صُممت كي تصمد في وجه تقلبات العالم؛ فهناك نقاط تفتيش وآليات تأمين وخطط دعم، وحفظ للسجلات بعناية، ولا توجد آلية من صنع الإنسان تضاهي الخلية من حيث التعقيد والتنظيم.

من المهم أن نضع في اعتبارنا أن الخلية هي مجتمع من الآلات الأوتوماتيكية، التي ليست لها إرادة، ولا بصيرة ولا ذاكرة ولا تتسم بالإيثار (ولا بالأنانية بالمعنى المفهوم). وكثيرًا ما تتعاون بشكل رائع لدرجةٍ تجعلنا ننسى هذا الأمر. في المقابل، قد تتصرف الخلايا بشكل لا يمكن التنبؤ به؛ لأننا لا نعرف إلا القليل عن كيفية عملها؛ فقد تعيش ونحن نتوقع لها الموت، أو قد تتفاعل تجاه أحد العقاقير القوية بطرق غير متوقعة مطلقًا.

تعمل البيولوجيا الجزيئية عند مستوى الخلية، وقلما تكترث بالكائن الحي ككل. والخلية هي «ذَرَّة الحياة»؛ إذ لا يمكنك أن تجد شيئًا حيًّا أصغر من الخلية. (أما الفيروسات فهي استثناء مثير للجدل؛ إذ هي أكبر قليلًا من الجينات، ولها أغلفة تحيط

بها، ولكن لا يمكنها التكاثر دون أن تسطو على آلات الخلايا التي تصيبها بالعدوى.) لكن وجهة النظر هذه لا ينبغي أن تقف في طريقنا؛ فبإمكاننا أن نفهم قدرًا عظيمًا من احتياجاتنا كبشر في ضوءِ ما يجري في خلية واحدة؛ فالخلية البشرية تحتاج للأكسجين والسكر لتصنع جزيئات جديدة، ولتتكاثر؛ مما يجعلنا قادرين على أن نتنفس ونأكل. تبدأ النبضات العصبية عند مستوى الخلية، ويتم تركيب أنسجتنا — من جلد وشعر وعظم وعضلات — جزيئًا بجزيء داخل الخلية، ونحن نخرج فضلاتنا للتخلص من نفايات الخلية، كما نصاب بالقشعريرة أو نعرق لتثبت درجة حرارة خلايانا. وهناك أسئلة كثيرة جدًّا عن طريقة أداء أجسامنا لوظائفها، ويمكن معالجتها على أساس البيولوجيا الجزيئية، والكثير من هذه الأسئلة مثير للاهتمام.

العاملون داخل الخلية

يعزو هالدين إلى إنجلز الافتراض القائل بأن الحياة هي «طريقة وجود البروتينات». (كان هالدين اشتراكيًّا، ولكنه لم يكن يقرأ لإنجلز من أجل دراسة علم الأحياء.) وهذه المقولة الحيوية تفترض أن البروتينات حية بشكل متأصل فيها، وهي فكرة يلفظها هالدين. بيد أنه لا يعترض على فكرة أن «البروتينات» هي مادة الحياة.

البروتينات هي مواد موجودة في كل أرجاء الخلايا الحية، وكثيرٌ منها يوجد في شكل إنزيمات، وهي جزيئات تحفِّز عمليات التغير الكيميائي؛ إذ تسرِّع الإنزيماتُ التفاعلاتِ الكيميائيةَ بعوامل قد تصل إلى ملايين عدة من المرات؛ ومن ثم تضمن ألا تكون تلك التفاعلات بطيئة بشكل يضر بالجسم. وقد تم اكتشاف الإنزيمات من دراسات عن التخمر، وكلمة «إنزيم» يونانية الأصل ومعناها «في الخميرة»، وقد وُجد في أواخر القرن التاسع عشر أن الإنزيمات يمكن استخراجها من خلايا الخميرة وتنقيتها، ومع هذا تبقى قادرة على إحداث التخمر رغم أنها حينئذٍ لم تَعُد جزءًا من كائن حي. وقد ساعد هذا الاكتشاف على التوصل إلى أن كيمياء الحياة تعمل حسب نفس الأسس التي تحكم كيمياء المواد غير الحية.

إذا افترضنا أن الخلية مدينةٌ ما، فالإنزيمات هي العاملون فيها. ولكي تستمر الخلية في عملها، يتم استيراد مواد خام وتحويلها إلى أشياء مفيدة، وتقطن الإنزيمات في المصانع الخلوية التي تمارِس هذا العمل. ومن الأوجه العجيبة لهذه الصناعة الإنتاجية أنها تتضمن مصانع لتصنيع العاملِين أنفسهم؛ فالإنزيمات أيضًا يتم تجميعها على خط الإنتاج.

ليست كل البروتينات إنزيمات؛ فبعضها يمارس دورًا تركيبيًّا لتكوين أنسجة الجسم، وبعضها يؤدي دور قوة الشرطة بالخلية، وبعضها يحمل الأمتعة جيئة وذهابًا في خدمة مكُّوكية بروتينية تجري على مسارات بروتينية، وبعضها يشغِّل البوابات المؤدية إلى الخلية؛ إذ تجلس في غشائها الخارجي كي تفتح البوابات وتغلقها في استجابة مطيعة للتعليمات التي تتلقاها. وهناك ما يقرب من ٦٠ ألف نوع مختلف من الجزيئات البروتينية في الخلايا البشرية، وكلٌّ منها يضطلع بمهمة عالية التخصص.

من المستحيل أن تخمن ماهية هذا الدور بمجرد النظر إلى البروتين؛ فجزيئاته غير مميزة في مظهرها، وأغلبها في شكل كريات (انظر شكل ١-٨) وتتكون أساسًا من الكربون والهيدروجين والنيتروجين والأكسجين وقليل من الكبريت. جميع البروتينات التي تؤدي مهمة خاصة لها نفس الشكل والبنية، ومهما صغر حجمها وبدت غير مميزة في شكلها، فقد تم تصميمها وتكوينها بإتقان بالغ.

إن الكثير من الإنزيمات تبدو في شكلها مثل حبة فاصولياء عليها عُقَد، مع وجود شق في المنحنى الداخلي، وفي هذا المنحنى يجري العمل كله؛ إذ يمارِس الجزيءُ عمليةَ التحفيز هناك. بعض البروتينات تمارِس مهامها في مجموعات؛ فتعمل «كوحدات فرعية» ضمن تجمُّع متعدد البروتينات. ويعد إنزيم سينثاز التريبتوفان الذي يوجد في البكتيريا واحدًا من أولئك؛ إذ يتم بناؤه من أربع وحدات فرعية قابلة للانفصال، ويعمل هذا الإنزيم على تركيب جزيء التريبتوفان الصغير، الذي يُعَد ضروريًّا لجميع الكائنات. لا يمتلك البشر هذا الإنزيم؛ ومن ثم يتعين علينا أن نحصل على التريبتوفان الذي يلزمنا جاهزًا بأن نأكل الكائنات التي تكونت هذه المادة في أجسامها.

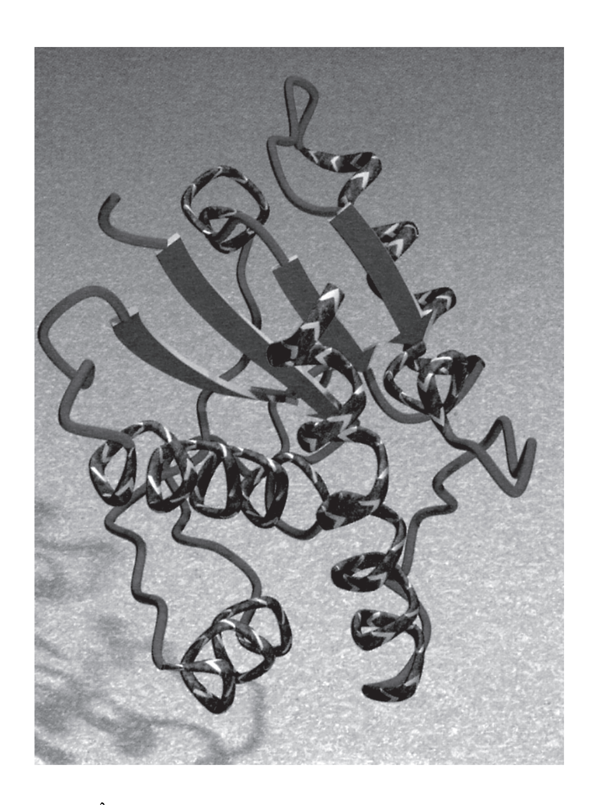
وكما يدل هذا المثال، فإن الإنزيمات وغيرها من البروتينات تُعطى أسماءً تكشف عن وظائفها؛ فإنزيم ديهيدروجيناز الكحول ينزع ذرة هيدروجين من جزيء الكحول (أي إنه يقوم بمهمة تسمى نزع الهيدروجين)، ويعمل إنزيم سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين (إيه تي بي سينثاز) على تخليق جزيء ثلاثي فوسفات الأدينوسين. ولكن ليست كل أسماء البروتينات واضحة هكذا؛ فالهيموجلوبين، الذي يحمل الأكسجين في مجرى الدم اشتُق اسمه من الكلمة اليونانية «هيم» بمعنى «دم» فضلًا عن احتوائه على بروتين يسمى «جلوبين»، وجزيئاته كروية الشكل. والميوجلوبين، الذي يعطيه الهيموجلوبين حمولته من الأكسجين في النسيج العضلي، اشتق الجزء الأول من اسمه (ميو) من كلمة يونانية معناها عضلة. هناك أسماء أخرى أكثر غرابة، منها الإيلاستين؛ وهو بروتين مرن

يوجد في كثير من الأنسجة المرنة القابلة للانثناء بالجسم، مثل الأوعية الدموية والحبال الصوتية. وهناك اليوبيكيتين؛ وهو بروتين يوجد في كل مكان بالجسم؛ لأنه يلعب دورًا أساسيًّا في عملية ضرورية في جميع أنحاء الجسم، وهي تدمير البروتينات غير المطلوبة.

ولا يمكنك أن تحزِّر فقط من خلال النظر إلى صور مثل الشكل (١-٨) أن جزيء البروتين هو في حقيقته سلسلة واحدة من جزيئات صغيرة ترتبط معًا. تنثني هذه السلسلة وتلتفُّ حول نفسها بكثافة لدرجةِ أنها تبدو مجرد كتلة من الذرات، ولكن الفحص الدقيق عن كَثَب للتركيبة المأخوذة من التصوير البلوري بالأشعة السينية يتيح لنا أن نتتبع الشريط الجزيئي وهو يلتوي ويلتف من خلال الكرية المدمجة. وأحيانًا ما يُظهر المتخصصون في كيمياء البروتينات هذا الشريط بجلاء في نوع مختلف من التمثيل الشكلي للبروتينات (شكل ٢-١)، فيمكنك أن ترى هنا أن التركيبة البروتينية مبنية على أساس تكرارِ مظاهرَ (أو موتيفات) معينةٍ مثل الملفات التي تسمى «ملولبات ألفا»، وتلك التي تسمى ملاءات بيتا؛ حيث تقع أجزاء عديدة من الشريط متوازية معًا.

يمكن تفكيك بنية البروتين أكثر من هذا من الناحية المفاهيمية. تتكون السلسلة الجزيئية من مجموعات صغيرة مميزة من الذرات، المرتبطة معًا في تتابع مثل حبات المسبحة حول الخيط. كانت هذه المجموعات قبل ذلك جزيئات منفصلة تسمَّى «الأحماض الأمينية»، وثمة عشرون نوعًا من الأحماض الأمينية في البروتينات الطبيعية، ويرتبط الحمض الأميني في السلسلة الجزيئية بالذي يليه عن طريق رابطة تساهمية تسمى «رابطة ببتيدية». كلا الجزيئين يطرحان عنهما قليلًا من الذرات غير الجوهرية لصنع هذه الرابطة، وما يتبقى — وهي رابطة أخرى في السلسلة — يسمى «الفضالة». وأما السلسلة نفسها فتسمى «عديد الببتيد».

وأي خيط من فُضَل الأحماض الأمينية هو مادة عديدة الببتيد، ويمكننا صنعها بأنفسنا بمجرد تسخين خليط من الأحماض الأمينية، ولكن لا يمكننا صنع البروتين بهذه الكيفية؛ ففي البروتين لا يكون ترتيبُ الأحماض الأمينية على طول السلسلة — أيْ «تتابُعُها» — عشوائيًّا؛ فالتتابع يتم انتقاؤه (أي بالانتقاء الطبيعي، حسب المفهوم الدارويني) بحيث تنضغط السلسلة وتنثني في الماء متخذة ذلك الشكل الكري للبروتين المحدد سلفًا، مع وضع جميع أجزاء السلسلة في أماكنها الصحيحة. يمكن إتلاف هذا الشكل عن طريق تسخين البروتين، وهي عملية تسمى «تغيير طبيعة البروتين». ولكن الكثير من البروتينات تستعيد انثناءها تلقائيًّا متخذة نفس البنية الكروية عند تبريدها. بتعبير آخر نقول إن السلسلة لديها ذاكرة من نوعٍ ما عن شكلها المنثني.



شكل ٢-١: في هذا التمثيل الشكلي لجزيء بروتيني يتم توضيح بِنْيته المكونة من سلسلة منثنية. تعبِّر الأسهم شبه المتوازية عن موتيفات ملاءات بيتا، بينما تدلُّ الأجزاء الملتوية التي تشبه الحليِّ على ملولبات ألفا. الجزيء هو إنزيم فوسفاتاز بروتين الفوسفوتيروسين، وهو مأخوذ من بقرة.

ما زالت تفاصيل «عملية الانثناء» هذه غير مفهومة بالكامل؛ بل هي أحد الألغاز المهمة التي لم يتم حلها في مجال البيولوجيا الجزيئية. ولكننا نعرف على أيِّ حالٍ ما الذي يمسك سلسلة عديد الببتيد في شكلها المتماسك في جزيء البروتين، وبإمكان أجزاء كثيرة من السلسلة أن تكوِّن روابط ضعيفة فيما بينها تسمى «روابط الهيدروجين». هذه الروابط تقوي تماسك السلسلة في شكلها المكوَّن من ملولبات ألفا وملاءات بيتا، ويتم

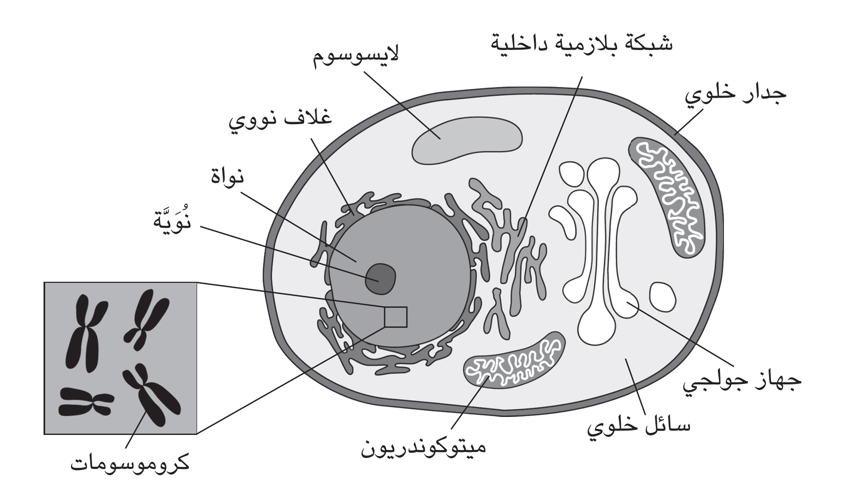
ربط بعض أجزاء السلسلة معًا بروابط أقوى تتكون بين ذرات الكبريت، التي تتدلى من «فُضَل» الحمض الأميني سيستئين، وبعض الفُضَل تكون غير قابلة للذوبان نسبيًّا في الماء، وهذه تميل للتجمع معًا في قلب كريَّة البروتين، محاطة بأجزاء من السلسلة تكون أكثر قابلية للذوبان في الماء؛ ومن ثم، البنيةُ المنثنيةُ الناتجةُ تعتمد على خصائص الفُضَل المختلفة، وأين توجد على طول السلسلة، بتعبير آخر، تعتمد على تتابعها. ويمكنك القول بأن الجزيئات البروتينية يتم تصنيعها برفقة تعليمات الانثناء الخاصة بها.

ولكن كيف «تَعرف» آلاتُ الخلية، عند صنع بروتينٍ ما، الترتيبَ الذي يجب أن تنتظم به الأحماض الأمينية معًا؟ هذا هو دور الحمض النووي دي إن إيه (الحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين)؛ إذ يتم تشفير تتابع كل بروتين في الجسم داخل جزيئات الدِّي إن إيه الموجودة في كل خلية. تقوم البروتينات بكل العمل (أو معظمه)، بينما يجلس الدِّي إن إيه بشكل سلبي في انتظار أن تتم قراءته، عندما تنشأ الحاجة للبروتين.

تُكتَب معلومات الدِّي إن إيه بلغة مختلفة عن معلومات البروتين، ولكن بوسع الخلية أن تترجِم فيما بين الاثنين. والدِّي إن إيه هو خيط آخر مكون من وحدات جزيئية أصغر — فهو «بوليمر» آخر — ولكنَّ لَبِناته البنائية مختلفة؛ إذ فضلًا عن الأحماض الأمينية، فإنه مكوَّن من جزيئات تسمى «النيوكليوتيدات». ويُعَد الدِّي إن إيه مكتبة من البِنَى البروتينية المكتوبة بحروف من «تتابعات النيوكليوتيدات» (انظر الفصل السابع)، وتكون المعلومات اللازمة لصنع كل بروتين — تقريبًا — مُشفَّرة في مخطط من الدِّي إن إيه يسمى «الجين».

ومن الواضح أن ثمة تناسقًا مؤثرًا هنا، وكلما احتاج عملٌ ما إلى وجود إنزيمات، فلا بد أن تصل الرسالة إلى المنطقة التي يستقر فيها الدِّي إن إيه. في الخلايا البشرية وخلايا جميع الكائنات الأخرى — بخلاف الكائنات الوحيدة الخلية، الأكثر «بدائية»، التي تسمى البكتيريا — يوجد جزء مركزي في الخلية يسمى «النواة»، وهذه تكون محاطة بسياج منيع هو الغشاء النووي (شكل ٢-٢). وتسمى الكائنات التي لها نوًى خلوية باسم «حقيقيات النوى».

في الخلايا البشرية تكون مادة الدِّي إن إيه مكدَّسة في شكل حُزَمٍ تُسمَّى «الكروموسومات». ولصنع البروتين، يجري فك شفرة جزء الدِّي إن إيه المحتوي على الجين المقابل وقراءته. وفي الواقع، البروتينات لا تُصنَع في النواة، ولكن في مكان آخر



شكل ٢-٢: تحتجز خلايا البشر وغيرهم من حقيقيات النوى ما لديها من مادة جينية وراثية (الدِّي إن إيه) في نواة مركزية. وتوجد أجزاء أخرى مختلفة (تسمَّى عُضَيَّات) تؤدي تشكيلة من الوظائف الأخرى، مثل تركيب البروتينات وإنتاج الطاقة. لاحظ أن الدِّي إن إيه يَكُون مُكدَّسًا في شكل حُزَم من الكروموسومات (كما يظهر هنا) فقط حين تكون الخلية على وشك الانقسام، وفي الأوقات الأخرى يكون مفككًا إلى خيوط رفيعة.

في الخلية يسمى الشبكة البلازمية الداخلية، وهي شبكة معقدة كالمتاهة من القنوات الغشائية. يتم «نسخ» الجين أولًا إلى جزيء قريب الشبه بالدِّي إن إيه، يسمى آر إن إيه (الحمض النووي الريبوزي)، وتنتقل جزيئات الآر إن إيه من النواة إلى الشبكة البلازمية الداخلية؛ حيث تتم «ترجمتها» إلى بروتينات، ثم يجري ترحيل البروتينات إلى الأماكن التي تحتاج إليها بالجسم؛ ومن ثم يجب أن تكون جزيئات الخلية قادرة على التواصل والتنقل.

يتم تنظيم العملية كلها بحيث لا تُصنَع البروتينات بشكل عشوائي، ولكن عند الحاجة إليها فقط؛ فلو كانت الخلية تَصنع جميع البروتينات بصفة مستمرة وَفق هواها، فسرعان ما ستتعطل. وقد نشأ الفهم الأساسي لكيفية حفاظ الخلية على النظام بين أجزائها ومكوناتها من الدراسة العملية التي أجراها عالِما الكيمياء الحيوية الفرنسيان فرانسوا جاكوب وجاك مونود في ستينيات القرن العشرين؛ إذ أظهرا أن الجينات تنظِّم

بعضها بعضًا، فتعمل على تشغيل أو تعطيل نفسها عن طريق مجموعة البروتينات التي تشفرها؛ على سبيل المثال، بعض الجينات التي تشفِّر البروتينات المستخدمة في الخلية (وتسمى «الجينات البنائية») تُقرَن بـ «جينات تنظيمية» تشفِّر البروتينات الكابحة. وحين يتم تشغيل الجين التنظيمي، يجري تركيب البروتين الكابح، الذي يرتبط بالجين البنائي، مانعًا إياه من «التعبير عن نفسه» (أي مانعًا نَسْخه وترجمته إلى البروتين الخاص به). وقد أطلق جاكوب ومونود على هذه الأجزاء المنظمة من الدِّي إن إيه اسم «الأوبيروتات»، وهي مجرد مَثَل واحد على أن الخلية تَستعمل ما يشبه الشبكة العنكبوتية من التفاعلات بين الجينات والبروتينات المختلفة. وقد تمكَّن علماء البيولوجيا الجزيئية في وقتنا الحالي من فك طلاسم كل تتابع النيوكليوتيدات في الدِّي إن إيه البشري تقريبًا، ولكنهم لم يتمكنوا من وضع تصور لخريطة الشبكة العنكبوتية المذكورة، إلا لأجزاء قليلة جدًّا منها.

التطور الجيني

لقد فتح العلم الجزيئي للجينات صندوقًا من الأسرار؛ إذ لم يقتصر على أنه ساعد في تفسير دخائل ألغاز الحياة، ولكنه طرح تساؤلات صعبة تتعلق بالسلوكيات والأخلاقيات البشرية، وفتح مجالات جديدة من التكنولوجيا المثيرة للجدل. كما أحدث هذا العلم تطورًا ثوريًّا في فهمنا للتطور، والكيفية التي نحن عليها.

إن الجينات هي «عُملة» الوراثة؛ فهي ميراث لا مفر منه من آبائنا. إن الفكرة القائلة بأن الصفات تنتقل من الأبوين إلى الذرية فكرة قديمة جدًّا وبدهية أيضًا، ولكنها صارت أكثر رسوخًا عن طريق العمل الذي أجراه القَس وعالم الأحياء النمساوي جريجور يوهان مندل في القرن التاسع عشر؛ إذ قادته تجاربه عن انتقال الصفات الوراثية لنبات البسلة لأنْ يفترض أن هناك عوامل مادية دقيقة تتوسط عملية الوراثة، منتقلة من الآباء إلى الأبناء. وسرعان ما صار واضحًا أن هذه «العوامل»، التي سمِّيت الجينات فيما بعد، هي جزيئية في طبيعتها، ولكن طوال النصف الأول من القرن العشرين كان الكثير من العلماء يظن أنها جزيئات بروتينية. كان هالدين كما عرفنا يشاركهم في هذا الاعتقاد، إلى أن جاء فرانسيس كريك وجيمس واطسون، وتوصلا إلى تركيبة الدِّي إن إيه في عام ١٩٥٣، فظهر وضع جديد أجبر الجميع على اعتبار الدِّي إن إيه — لا البروتينات — المادة الجزيئية للوراثة، ونسيج الجينات.

وضع هذا الاكتشافُ التطورَ على أساس جزيئي متين، فما تحصل عليه البويضة المخصبة من الوالدين ليس جسمًا سابق التكوين، وإنما مجموعة من التعليمات الجينية لخطة جسمانية. والتغيرات التطورية التي تحدث ببطء من جيل إلى جيل هي نتيجة لتغيرات في البنية الجزيئية للجينات الوراثية. يتم نسخ الدِّي إن إيه حين تنقسم الخلية، ولكن هذا لا يحدث بشكل مثالي دائمًا؛ ومن ثم قد يكون الدِّي إن إيه الذي يحصل عليه الطفل من أبيه وأمه مزيجًا معيبًا بقدر طفيف من جيناتهما. بصفة عامة لا تكون تلك العيوب ذات أهمية، وأحيانًا ما تكون ضارة (ولكن لاحظ أن معظم الأمراض الوراثية هي نتاج «وراثة» الطفل لجين معيب، وليست لاكتساب خطأ نتيجة النسخ العشوائية). في أحوال نادرة جدًّا يكون للطفرة الجينية تأثير مفيد، بحيث تجعل الكائن أفضل تسلحًا في معركة البقاء. قد تكون تلك الميزة طفيفة للغاية، ولكن التطور يتقدم من خلال تلك الخطوات الشديدة الدقة؛ إذ إن الميزات الدقيقة تؤدي إلى نجاح إيجابي أعلى؛ ومن ثم إلى زيادة بطيئة في نسبة وجود جين طافر بين أفراد التجمع السكاني.

ما يعنيه كل هذا هو أن الجينات بمنزلة سجل جزيئي للتطور. كان لكلٍّ من البشر والأرانب سلف مشترك له مجموعات الجينات عينها، والفارق الذي يوجد الآن بين المجموعتين الكاملتين الكليتين من الجينات الخاصة بكلٍّ من البشر والأرانب (أي «الجينوم» الخاص بكلٍّ منهما) يعكس التباعد الذي يُعزى إلى تراكم الطفرات الوراثية. وهذا يمكِّن العلماء من أن يعيدوا بناء التواريخ التطورية — ليستنتجوا النظام الذي تباعدت فيه الأنواع بعضها عن بعض — وذلك من البنية الجزيئية للجينات. في السابق، كان يتعين على علماء الحفريات أن يقوموا بهذه الاستنتاجات على أساس أشكال الأجسام أو العظام، أما الآن فلديهم مقياس جزيئي كَمِّي للتغيرات التطورية أكثر سهولة.

وبصفة خاصة يمكن إعادة إنشاء الأشجار التطورية (أو ما يسمى «تاريخ تطور السلالة») عن طريق مقارنة الدِّي إن إيه الخاص المحصور بين جدران أجزاء الخلية المسماة الميتوكوندريون (انظر شكل ٢-٢)، وهذا هو فرن الخلية الذي تُنتَج فيه الطاقة (انظر الفصل الرابع). وخلافًا للدِّي إن إيه الذي في النواة، فإن الدِّي إن إيه الميتوكوندري يأتي مباشرة من الأم، وفي حين أن الدِّي إن إيه النووي يتغير بإعادة تنظيم الجينات الخاصة بكلا الأبوين، فإن الدِّي إن إيه الميتوكوندري لا يتغير إلا بالتراكم التدريجي للطفرات من جيل إلى جيل؛ ومن ثم يُعَد سجلًّا أفضل للتغيرات التطورية. وفي عام ١٩٨٧ قام آلان ويلسون من جامعة كاليفورنيا بمدينة بيركلي ومساعدوه بمقارنة الدِّي إن إيه

الميتوكوندري في أناس من جماعات عِرقية متعددة. وبمعرفة معدل التطافر في المتوسط توصلوا إلى أن جميع العينات (وعلى سبيل التوسع، الدِّي إن إيه الميتوكوندري في جميع البشر الأحياء) منحدرة من نسخة واحدة كانت موجودة منذ ٢٠٠ ألف سنة في خلايا امرأة أفريقية؛ وهي السلف المشترك لجميع البشر. إن الجزيئات تحتوي على سجل للتاريخ أغنى من أي شيء يمكن العثور عليه في شظايا آنية فخارية أو في روابي قبور قديمة.

عالم الآر إن إيه

إن جميع الكائنات الحية — من أحقر أنواع البكتيريا إلى أعلى الملوك والملكات مكانة — تكون مادتهم الجينية محتشدة داخل الدِّي إن إيه الخاص بهم، وتوضع موضع التنفيذ بواسطة البروتينات؛ يعني هذا أن جميع صور الحياة لها أصل مشترك.[١] ولا بد أن الكائنات الوحيدة الخلية الأكثر بدائية قد احتوت على بروتينات ومادة دي إن إيه مشابهة جدًّا لتلك التي في البكتيريا «البسيطة» اليوم.

ولكن ما الذي جاء من قبل؟ إن التعايش التكافلي الجزيئي الذي بموجبه يقوم الدِّي إن إيه بتشفير البروتينات، وتساعد البروتينات الدِّي إن إيه على أن يؤدي وظيفته ويتضاعف؛ لَهُوَ أمر شديد التعقيد حتى في البكتيريا. ولا يمكن أن تكون البروتينات ولا مادة الدِّي إن إيه قد جاءتا إلى الوجود تلقائيًّا من فتات جزيئات عضوية مبعثرة في أنحاء البحار والبحيرات في الأرض القديمة؛ فتراكيبها شديدة التعقيد بما يؤكد أنها لم تتشكل عشوائيًّا. وأسهل لنا أن نفهم (من حيث المبدأ على الأقل) فترة الـ ٣٫٨ مليار عام من التطور من أقدم أنواع البكتيريا أو الطحالب إلى يومنا هذا من أن نفهم كيف حدث — ربما على مدى مئات قليلة من آلاف السنين — أن تغيرت الأرض من كوكب قاحل إلى كوكب يحتضن الحياة.

افترض علماء الكيمياء الكثير من النظريات المبتكرة التي وفقًا لها ربما تحولت المكونات غير العضوية للأرض الوليدة، مثل الميثان وثاني أكسيد الكربون والنشادر والماء والنيتروجين، إلى الأحماض الأمينية والسكريات المطلوبة لصنع جزيئات الحياة. لكنها كلها غير مؤكدة، ولم تنتصر أي نظرية عن الأصل الكيميائي للحياة. ولكن ما زالت الصعوباتُ الفكرية في التقدم من مرحلة الصخور والغازات والماء إلى أنماط أولية من الجزيئات الحيوية أصغرَ من تلك المتعلقة بتحويل هذه الكتل البنائية إلى خلايا تمارس وظائفها ومليئة بالبروتينات والدِّي إن إيه. الأمر أشبه بمعضلة الدجاجة والبيضة؛ فكلٌّ من البروتينات وحدها والدِّي إن إيه وحده يكون بلا فائدة.

الطريقة المفضلة للخروج من هذه الأحجية هي أن نحوِّل الاهتمام تجاه ذلك الوسيط المتواضع؛ الآر إن إيه، الذي يحمل المعلومات الجينية إلى آلات تركيب البروتينات. إن الآر إن إيه أكثر تنوعًا في أنشطته من الدِّي إن إيه، وفي ثمانينيات القرن العشرين اكتُشفت جزيئات من الآر إن إيه في الخلية يمكنها أن تعمل كعوامل حفازة لعملية إعادة تنظيم نفسها. إن الجينات البشرية تقابل قدرًا كبيرًا من الدِّي إن إيه «المُهمَل» الذي تحتاج أن تتخلص منه قبل أن يتسنَّى قراءة الرسالة بوضوح (انظر الفصل السابع). وهذا الدِّي إن إيه المُهمَل يجري نسخه إلى آر إن إيه، ولكن يتم التخلص منه قبل أن يُترجَم الآر إن إيه إلى بروتين. وعملية الحذف هذه تجري إلى حد كبير بالاستعانة بالإنزيمات، ولكن بعض جزيئات الآر إن إيه يمكن أن تؤدي هذه العملية بغير مساعدة، وهذه تسمى «الريبوزيمات»؛ مما يعكس حقيقة أنها تُظهر ميولًا شبه إنزيمية.

أثناء تسعينيات القرن العشرين، وسَّع علماء الكيمياء الحيوية من إدراكهم لقدرات الآر إن إيه. وباستخدام تقنيات التكنولوجيا الحيوية التي استُحدثت للتعامل مع الدِّي إن إيه وإعادة كتابته، نجحوا في تخليق جزيئات آر إن إيه اصطناعية يمكنها إجراء جميع صنوف العمليات الكيميائية، مثل ربط النيوكليوتيدات بعضها ببعض أو تكوين روابط بين ذرات الكربون. وتُظهِر هذه الدراسات أن الآر إن إيه متنوع الأنشطة لدرجة تكفي لإحداث الكثير من التحولات الكيميائية التي تعدُّ ضرورية كي تبدأ الحياة. باختصار، الآر إن إيه يمكن أن يعمل كحامل للجينات، وأيضًا كعامل شغال.

ومن ثم ألفينا الكثير من العلماء الباحثين في أصل الحياة يفترضون وجود حقبة زمنية يسمونها «عالم الآر إن إيه»، كانت موجودة قبل ظهور ذلك النشاط المزدوج للبروتينات والدِّي إن إيه. لا يزال جزيء الآر إن إيه شديدَ الصعوبة في صنعه في ظروف يمكن مقارنتها بما كان عليه الحال في الأرض الوليدة، ولكن عالم الآر إن إيه يكسر ذلك المأزق الذي تفرضه الاعتمادية المتبادلة بين البروتينات والدِّي إن إيه؛ ومن ثم يتيح رابطة مفاهيمية بين تكوُّن الجزيئات العضوية الصغيرة، وظهور الخلايا البدائية الأولى.

الحياة الاصطناعية

لو استطعنا في نهاية الأمر أن نفهم أصل الحياة — ليس بالضرورة كيف بدأت بالفعل، ولكن على الأقل كيف «يُحتَمَل» أن تكون قد بدأت — فهل يمكننا حينئذٍ أن نعيد إجراء هذه العملية في المعمل؟ هل يمكننا أن نخلق الحياة من لا شيء؟

لدينا من المعلومات عن الأساس الجزيئي للحياة ما يكفي كي يكون الباحثون قادرين على أن يتفكروا في متطلبات بناء خلية اصطناعية. قد يبدو هذا الاحتمال مثيرًا للخوف؛ فماذا لو صنعنا خلية كانت لديها القدرة على التكاثر أكثر بكثير من الخلايا «الطبيعية»؟ هل ستحتل العالم كأنه غزو من كائنات فضائية؟

هذا ليس من قبيل الخيال العلمي. في الواقع، أظن أن الخلية الاصطناعية سيتم صُنعها، لحسن حظنا أو سوئه، في غضون القرن الحادي والعشرين. إن صُنع الدِّي إن إيه التخليقي يُعَد الآن بالفعل من الأمور الروتينية، وكذلك إعادة كتابة الجينات، ويعكف الآن الكثير من الكيميائيين على بناء «بروتينات مصمَّمة» من لا شيء. ولقد صرح علماء الكيمياء الحيوية جاك زوستاك وديفيد بارتل وبيير لويجي لويزي بما يلي:

> إن ما تحقق في مجال التطور الموجَّه والفيزياء الحيوية الغشائية يجعل تخليق الخلايا الحية البسيطة هدفًا يمكن تخيُّله، إن لم يكن حقيقة يمكن التنبؤ بها.

إنهم يفترضون أن بالإمكان إنشاء «خلية في حدها الأدنى» من ريبوزيمات خُصِّصت لهذا الغرض، وقد لوحظ بالفعل وجود نسخة بدائية من ريبوزيم يمكنه تجميع الآر إن إيه (ومن ثم يمكنه أن يضاعف نفسه). هذه الخلايا يمكن أن تُغلَّف بأغشية اصطناعية تشبه الأغشية الخلوية، ولكن لديها القدرة على النمو والانقسام، وقد صنع لويزي تلك «الأغشية المتضاعفة». وربما تنجح «الخلايا الأولية» المتضاعفة في تطوير جزيئات آر إن إيه قادرة على تركيب أحماض أمينية لتتجمع في شكل بروتينات. ويقول الباحثون إن هذا إن تحقق فسوف يسمح لنا بأن «نعيد تشغيل شريط التطور المبكر».

على الذين يتنبئون بوجود أغراض فظيعة لتلك التجارب أن يضعوا في أذهانهم أن من السخف أن يسلك العلماء هذا المسلك الشديد الوعورة لإنتاج بعض الأسلحة المميتة، بينما يمكن بالفعل وبسهولة نسبية صنع أسلحة كيميائية وبيولوجية فتاكة. ومع ذلك، من المستحيل أن نعرف لأي مدًى يمكن أن تصل بنا تلك الأبحاث! تلك هي حقيقة العلم الجزيئي؛ فهو مجال إبداعي يعطينا شيئًا ملموسًا في مقابلِ ما بُذل من جهود. وهنالك تكمن كل البراعة الفنية، وكل الروعة وكل الخطر. وفي نهاية الأمر، لن نحصل إلا على الجزيئات التي نستحقها.

هوامش

(١) إننا ببساطة لا نعرف إن كانت الشراكة بين الدي إن إيه والبروتين شرطًا ضروريًّا للحياة، وسنكون متعجلين إذا افترضنا أن الحياة يمكن ألا يكون لها أساس جزيئي آخر. ولكن لم يتم التوصل إلى شيء مختلف حتى الآن. وليس من الصعب أن نتخيل أن حدوث تعديلات نظامية طفيفة في الدي إن إيه يمكن أن يؤدي إلى نظام جيني بديل؛ ولكننا لم نرَ هذا يحدث في أيٍّ من الكائنات.

الفصل الثالث

المهمة الشاقة: صنع مواد من جزيئات

إن الجزء الأصعب في رحلات الفضاء (بغض النظر عن الضجر والخطر) هو مغادرة الأرض؛ فإذا وصل الصاروخ إلى الفضاء وخوائه، وتَحرَّر من تأثيرات الجاذبية القوية، فستكفيه قوة دفع صغيرة لإبقائه متحركًا باستمرار وبلا توقف تقريبًا؛ ومن ثم فإن معظم الوقود الذي يستهلكه الصاروخ يحتاجه لمجرد أن يفلت من جاذبية الأرض، وهذا الوقود والمحركات التي تحرقه يعزى إليهما الجزء الأكبر من كتلة الصاروخ. ولا زلتُ أذكر رحلات أبولو إذ كان الصاروخ يغادر الأرض سامقًا كالبرج ويعود وما تبقَّى منه سوى كبسولة صغيرة.

إذا تمكَّنا من إطلاق سفينة فضائية من خارج الغلاف الجوي للأرض فستقل حمولتها كثيرًا. وقد بيَّن آرثر سي كلارك في روايته «ينابيع الفردوس» الكيفية التي يمكن أن يحدث بها هذا؛ فقد افترض إنشاء «مصعد فضائي»؛ إذ تدور محطة في مدار ثابت حول الأرض، بحيث تكون مرتبطة بالأرض بكابل طويل فائق القوة، ويتم نقل المعدات الفضائية والمسافرين في رحلات مكوكية باستخدام ذلك المصعد وصولًا إلى المحطة الفضائية، ثم يمكن نقل كل ذلك إلى الفضاء باستخدام جزء يسير من احتياجات الوقود الذي كان يُستهلَك في حالة الإطلاق من الأرض.

ولكي تكون المحطة في مدارها مرتبطة بسطح الأرض، سنحتاج إلى كابلات أقوى من أي شيء لدينا في الوقت الحالي، ويجب أيضًا أن تكون خفيفة الوزن، فلو كانت الكابلات من الصلب فسيكون وزنها ثقيلًا جدًّا.

ليس علينا تدبر فكرة مصعد الفضاء الخيالية لتفسير سبب احتياجنا إلى مواد تكون قوية، وشديدة التحمل، ومضادة للتآكل، وخفيفة الوزن ... إلخ. ولكن سيناريو كهذا يثير التساؤل بشأن المدى الذي يمكن أن يصل إليه الإنسان في مجال تحسين

خواص المواد. إن تلك الكابلات الفضائية الفائقة القوة توضع أيضًا في الاعتبار لإطلاق الأجسام إلى الفضاء، فيما يشبه عملية القذف بالمقلاع يكون فيها الجسم المطلوب إطلاقه مرتبطًا بكابل مؤقتًا يوصله بقمر صناعي يدور حول الأرض. ويجب أن تكون تلك الكابلات أو الحبال خفيفة الوزن وقوية في الوقت نفسه. كما أن هناك عددًا لا يحصى من الاستخدامات الأخرى الأكثر واقعية لتلك الكابلات القوية، مثل تعليق الجسور وربط منصات الحفر بقاع البحر.

طالما كانت الألياف القوية متاحة لدينا، ومن حسن حظنا أن الطبيعة تمدنا بها بوفرة، مثل الحرير والقنب والخشب والشَّعر. في مرحلةٍ ما قبل الثورة البلشفية في روسيا كان الحرير يُستخدم للوقاية من طلقات الرصاص، ويجري استخدام حرير اصطناعي الآن لنفس الغرض.

إن عصر البلاستيك (أو اللدائن) الذي بدأ بحماس في مستهل القرن العشرين قد استحدث الألياف التخليقية، مضيفًا إياها إلى ما هو موجود من الألياف الطبيعية، وتلك الألياف الاصطناعية لها مزايا وعيوب. صُنعت أوائل أنواع البلاستيك بطريق التجربة والخطأ، أما البلاستيك الحديث فهو على العكس؛ إذ يتم تصميمه على المستوى الجزيئي وفق التطبيقات التي سيُستعمل فيها. وفي هذا الفصل المَعْنِي بالنواحي الجزيئية للمواد سوف أركِّز مناقشتي على الألياف، سواء الطبيعية أو تلك التي من صُنع الإنسان؛ إذ إنها تقدم بعض الأمثلة الرائعة والتصويرية عن كيفية تأثير التراكيب الجزيئية على نوع خصائص المواد التي يهتم بشأنها المهندسون.

إلا أن التفاعل بين العلوم الجزيئية وهندسة المواد أوسع نطاقًا من هذا بكثير؛ فقد صُممت جزيئات يمكن تحويلها إلى موادَّ سيراميكية شديدة الصلابة وقادرة على تحمل درجات الحرارة العالية، وهذه تُستخدم في الهندسة الجوية الفضائية وصناعة التوربينات وتوليد الطاقة. كما توجد موادُّ صُنعت من جزيئات (لا سيما البوليمرات) مصممة بهدف توصيل الكهرباء والْتقاط النبضات الضوئية وتوجيهها وتحويلها، وغربلة جزيئات أخرى، وحماية الأسطح من التآكل أو التلوث. وهذه المواد تتضمن موادَّ خامًا «ذكية» تستجيب لتغيرات البيئة، ويمكن أن تعمل على نحو مستقل كمفاتيح تحويل وصمامات ومضخات. ولا شك أن تأثيرَ المواد ذات الأساس الجزيئي على مجال الطب عظيمٌ، بل ومن المتوقع أن يصير أكثر أهمية على نحو متزايد؛ فهي تمنحنا الأطراف والأعضاء والأنسجة الصناعية وأجهزة إعطاء العقاقير، والخيوط القابلة للتحلل بيولوجيًّا

للجراحة، وأجهزة الاستشعار لمراقبة الحالة الصحية للجسم. ويومًا ما سوف تمكِّننا الهندسة الجزيئية من استنبات كُلْية جديدة أو قلب جديد بدلًا من العضو التالف.

كابلات الجسم

إن الفكرة القائلة بأن أجسادنا هي كتلة من تجمعات خلوية من البروتينات لا تتفق مع واقع خبراتنا؛ فنحن نشعر بأنفسنا على أننا تركيبة من المواد والأنسجة؛ من الجلد والعظام والعضلات والشعر والأظفار. ولهذه البنية من المواد خصائص ضرورية تجعلنا نتفاعل مع عالمنا؛ فالطبقة الخارجية من الجلد هي مجرد كسوة تتكون من خلايا مبرمجة على الموت بمجرد أن تكوِّن النسيج، ونفس الشيء ينطبق على الشعر الذي يحقق العزل للجسم، وعلى الأظفار التي تعد بقايا تطورية لمخالب حيوانية كانت في الماضي تخمش وتمزق. وتتكون العظام والأسنان في معظمها من مادة غير عضوية صلبة؛ فوسفات الكالسيوم. وأغلب هذه المواد يتم تجديده باستمرار أثناء حياتنا، بينما لا يحدث هذا للبعض الآخر، مثل بروتينات عدسة العين.

تمارس هذه المواد الطبيعية في الجسم أدوارًا ميكانيكية، وتحافظ على سلامتنا البنيوية؛ فهي بمنزلة اللبنات والعوارض والكسوة الخاصة بمبنًى ما؛ إذ تحمي العمال من العناصر الخارجية، وتُئْوي كل الأشياء الضرورية من أسلاك وأنابيب توصيل مطلوبة لأداء العمل كالمعتاد. يتكون الكثير من المواد البنيوية بالجسم من البروتينات، وهذه البروتينات البنيوية — بخلاف الإنزيمات — لا يتعين عليها أن تمارس أعمالًا كيميائية دقيقة، ولكن لا بد ببساطة أن تكون (على سبيل المثال) متينة أو مرنة أو مضادة للماء. نظريًّا، هناك الكثير من المواد الأخرى إلى جانب البروتينات قد تكفي لأداء هذه المهمة؛ وبالفعل، فإن النباتات تستخدم السليولوز (وهو بوليمر سكري بالأساس) لصنع أنسجتها. إلا أن أعجوبة البروتينات تتمثل في أنها شديدة التنوع؛ إذ يمكن نسج سلاسلها الجزيئية في ألياف قوية تكون متقاطعة أو متشابكة، وتُكوِّن المادة الخلوية الصلبة في القرون والمخالب، أو تشكِّل «ملاءات» مرنة. فضلًا عن هذا، فإن المواد الخام التي تُصنَع منها البروتينات توجد بكثرة في الخلايا. ولأن البروتينات يتم تشفيرها داخل الجينات، فإن الخصائص الجزيئية التي تُكسِب البروتين البنائي خواصه الميكانيكية يمكن تعديلها بدقة ثم إعادة إظهارها كما ينبغي.

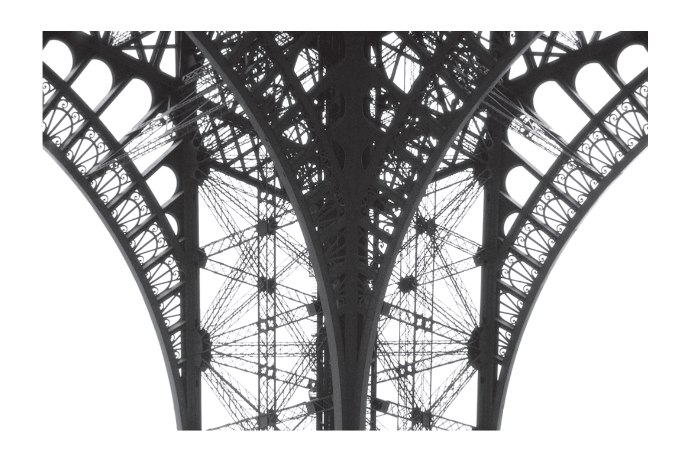
يعتبر الكولاجين أكثر أنواع البروتين البنائي وفرة في الجسم البشري؛ حيث يشكِّل نحو ربع الكتلة الإجمالية للبروتين. وهو بروتين بسيط نسبيًّا؛ إذ تحتوي جزيئاته

الشبيهة بالسلاسل في أغلبها على نوعين من الأحماض الأمينية؛ هما الجلايسين والبرولين. يشكل الجلايسين كل ثالث رابطة في السلسلة، فيما يقبع البرولين وأحماض أمينية أخرى (لا سيما اللايسين) في المنتصف. بعض وحدات البرولين تكون معدلة كيميائيًّا، بأن أضيفت إليها ذرة أكسجين، وهذا يحدث من خلال تفاعل يدخل فيه فيتامين ج؛ ولهذا يحتاج الجسم إلى هذا المركَّب للحفاظ على سلامة الأنسجة. ويؤدي نقص فيتامين ج إلى الحالة المعروفة بالإسقربوط، والناتجة عن الكولاجين التالف الذي لم يتم استبداله.

يُعَد الكولاجين مثلًا للطريقة التي تختلف بمقتضاها المواد البنائية الطبيعية التي أساسها البروتينات عن أغلب اللدائن التخليقية التي أساسها البوليمرات. كلتاهما تتكون من جزيئات في شكل سلاسل، ولكن في البروتينات البنائية تتجمع هذه السلاسل معًا في تكوينات مرتبة معقدة مكوِّنة لُيَيْفات أكثر سماكة، وكأنها حبال نُسجت من خيوط سميكة نُسجت من خيوط رفيعة. وهذا النوع من الترتيب الذي تُبنَى بمقتضاه العناصر البنائية بشكل متتابع من مكونات أصغر يوصف بأنه ترتيب «هرمي تدريجي». وقد تعلم المهندسون أن يستعملوا نفس المبدأ؛ إذ يحتوي برج إيفل الأعجوبة، الذي صممه جوستاف إيفل، على دعامات صُنعت من شبكات من عوارض أصغر حجمًا، وبعضها بُني من عوارض أصغر وأصغر (شكل ٣-١).

يظهر الكولاجين في أنواع مختلفة من البنى الكبيرة الحجم، وكأنها تصميمات متعددة لأحد الأبراج، لكنها كلها مبنية من نفس العناصر الأساسية الصغيرة الحجم (شكل ٣-٢). إن كل سلسلة جزيئية من الكولاجين ملتفة على نفسها في شكل لولب، وتلتوي ثلاثة من تلك اللوالب بعضها حول بعض لتشكل «لُيَيْفة دقيقة» ثلاثية اللوالب شبيهة بالحبل، وتتجمع هذه اللُّيَيْفات الدقيقة معًا في نسق متداخل لتكوين خيوط سميكة تسمى لُيَيْفات مطوقة. وهذا التداخل يسبب مظهر الحُزَم الداكنة تحت المجهر الإلكتروني. تشكل اللُّيَيْفاتُ المطوقةُ الأنسجةَ الضامَّةَ بين الخلايا؛ فهي الكابلات التي تضم اللحم البشري في إحكام وتكسبه المتانة. يتكون العظم من لُيَيْفات مطوقة من الكولاجين، نُثرت فيه بلورات دقيقة من معدن الهيدروكسي أباتيت الذي أساسه فوسفات الكالسيوم. وبسبب ارتفاع المحتوى البروتيني داخل العظم، فإنه يتصف بالمرونة والمتانة، فضلًا عن صلابته.

ومع ذلك، فإن لُيَيْفات الكولاجين ليست شديدة القوة في حد ذاتها؛ لأن الجزيئات ليست مترابطة أو متشابكة معًا. ولكن تحتوي أنماط أخرى من الكولاجين على حزمٍ

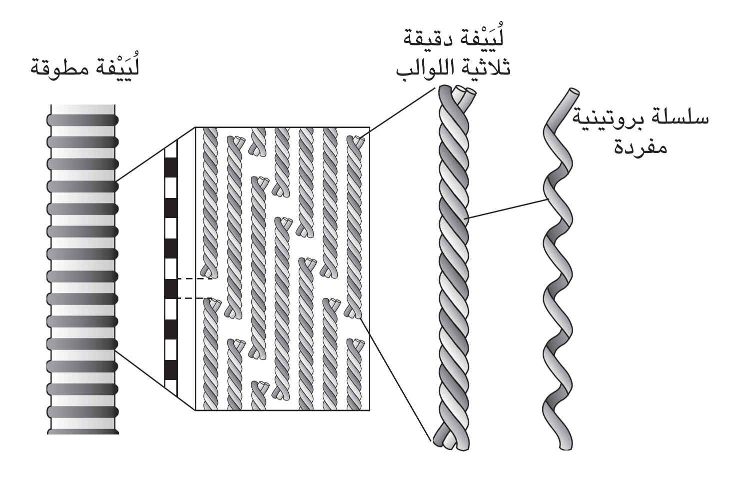


شكل ٣-١: الترتيب الهرمي البنائي، الذي يشيع في مواد الطبيعة، مُمثَّل هنا في برج إيفل.

مترابطةٍ عرضيًّا من اللُّيَيْفات الدقيقة متحدةٍ في شكل نوع من الشبكة الصلبة، وهذا يُنتج الغشاء الذي يفصل الطبقات الخارجية من الجلد عن الطبقات الداخلية.

على النقيض من التشابك غير المنتظم في النسيج الضام، تحتوي قرنية العين على لُيَيْفات كولاجينية مكدسة جنبًا إلى جنب في ترتيب منتظم، وهذه اللُّيَيْفات شديدةُ الصغر لدرجة تجعلها لا تشتت الضوء؛ مما يجعل مادة القرنية شفافة تمامًا. والتصميم الأساسي — الذي يتكرر كثيرًا في الطبيعة — هو أنه عن طريق التلاعب بالتركيبة الكيميائية، والأهم، بالترتيب الهرمي لنفس الجزيئات الأساسية، يمكن استحداث أنواع مختلفة عديدة من الخصائص المادية.

وكذلك فإن الكولاجين تتشكل منه المادة المرنة المتينة للأوتار والأربطة العضلية، ومادة العاج الداعمة للأسنان. ولكن البروتينات التي في المناطق الخارجية من الجسم — أيْ في الجلد والشعر والأظفار، فضلًا عن قرون الحيوانات وحوافرها وأظلافها — تكون من نوع مختلف؛ إذ تتكون هذه الأنسجة في أغلبها من مادة الكيراتين، وهو نوع آخر مركَّب هرميًّا. وهنا أيضًا في حالة الكيراتين تلتف السلاسل الجزيئية في شكل لوالب، وهذه تتجمع أزواجًا في شكل خيوط ملتفة مزدوجة اللوالب، ويلتف كل اثنين من هذه الخيوط معًا في شكل «لفة فائقة» تسمى اللُّيَيْفة الأولية، وتتركب كابلات الكيراتين الأولية



شكل ٣-٢: الكولاجين له بنية هرمية ملتوية. ويسبب الترتيبُ التداخليُّ لهذه اللُّيَيْفاتِ الكولاجينيةِ الدقيقةِ ظهورَ الحزمِ الداكنةِ التي تُرى مجهريًّا في اللُّيَيْفات المطوقة؛ حيث يثبت عاملُ صبغ معدني نفسَه عند نهايات هذه اللُّيَيْفات الدقيقة.

من مجموعات من ثماني لُيَيْفات أولية. تكون هذه الألياف محاطة بشبكة من بروتينات شبيهة بالكيراتين غير منتظمة تترابط تقاطعيًّا مع ذرات من الكبريت، وكأنها كابلات من الفولاذ مطمورة في الخرسانة، وهذه الروابط التقاطعية تحدد قوة المادة؛ فالشعر والأظفار تكون أكثر امتلاءً بالروابط التقاطعية من الجلد، والشعر المتموج أو المجعَّد يمكن فرده بتكسير بعض هذه الروابط التقاطعية الكبريتية لجعل الشعر أطوع وأسهل تصفيفًا.

يعتبر الشعر من الألياف الطبيعية النافعة، ولكن معظم المواد المصنوعة من بروتينات الكولاجين والكيراتين تتشكل بدلًا من هذا في شكل ملاءات (كما في الجلد) أو كتل (كما في القرون والحوافر)، ولديها تركيبة ليفية على المستويين الجزيئي والمجهري؛ إذ إن من الأسهل للآلية الإنتاجية في الخلايا المفردة أن تُصنِّع هذه التراكيب من أن تصبَّ لَبِنات صلبة على سبيل المثال. ويعيد الجسم توظيف هذه الألياف الدقيقة في أشكال أخرى.

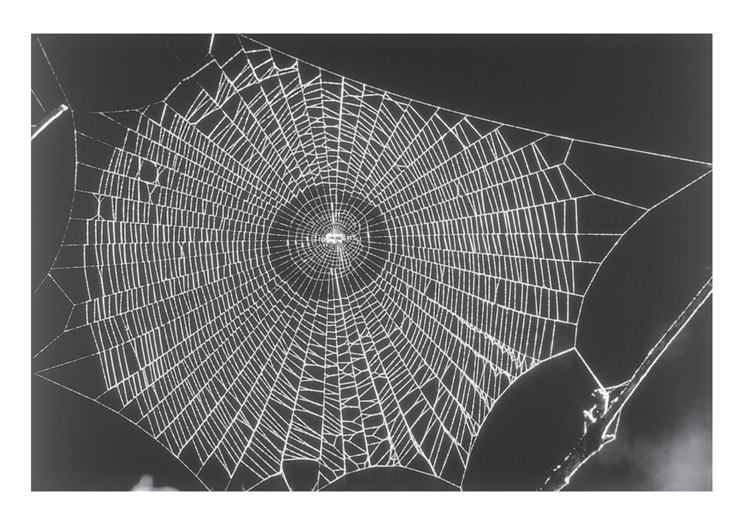
أعاجيب الحرير وخيوط العنكبوت

من الناحية الأخرى، يُظهر لنا الحرير إلى أي مدًى يمكن أن ينجح التطور في عملية صنع ألياف كلما تَطلَّب الأمر ذلك؛ فلدينا هنا مادة يمكن غزلها إلى خيوط عنكبوتية لا تراها الذبابة الطائرة، إلا أنها مرنة بما يكفي لامتصاص الطاقة حين تصطدم الذبابة بشبكة العنكبوت، وقوية بما يكفي لجعلها لا تتقطع عند حدوث هذا (شكل ٣-٣). وقد ثبت أن الحرير أقوى من الفولاذ وأقوى من أفضلِ ما صَنَعَ الإنسان من ألياف، ويُعجب به المهندسون لقوته، ويثمِّنه صناع المنسوجات للمعانه الرائع ونسيجه الجميل وقدرته على امتصاص الأصباغ الزاهية.

تصنع العنكبوت الحرير لاستعمالات كثيرة، وتكسبه صفة مختلفة في كل حالة. يتم غزل الخيوط الأساسية لشبكة الحرير العنكبوتية من نوعية حبال السحب القوية، بينما تُستخدم أنواع الحرير الأخرى في صنع ألياف داعمة، وخيوط تربط الشبكة بالفرع أو الرافدة، وخيوط لتثبيت الفريسة، وخيوط لتقميط اليرقات النامية، وهلم جرًّا. وجميع هذه الحرائر تتكون من سلاسل بروتينية تسود فيها الأحماض الأمينية من أنواع الجلايسين والألانين والسيرين، ولكن التوليفة المحددة من المكونات يتم تكييفها حسب استعمال الحرير.

تعد خصائص الحرير الفذة العجيبة نتاجًا للطريقة التي تتشكل بها السلاسل البروتينية؛ فبينما في الكولاجين والكيراتين تلتف السلاسل في شكل لوالب، نجد في الحرير أن العنصر البنائي الأساسي ليس لفة وإنما ملاءة. تستقر السلاسل المجاورة جنبًا إلى جنب في صفوف متراصة، وترتبط كل سلسلة باللتين على الجانبين عن طريق روابط هيدروجينية ضعيفة نسبيًّا (انظر الفصل الثاني)، وهذه تربط السلاسل معًا لتشكِّل ما تسمَّى ملاءات بيتا (شكل ٣-٤).

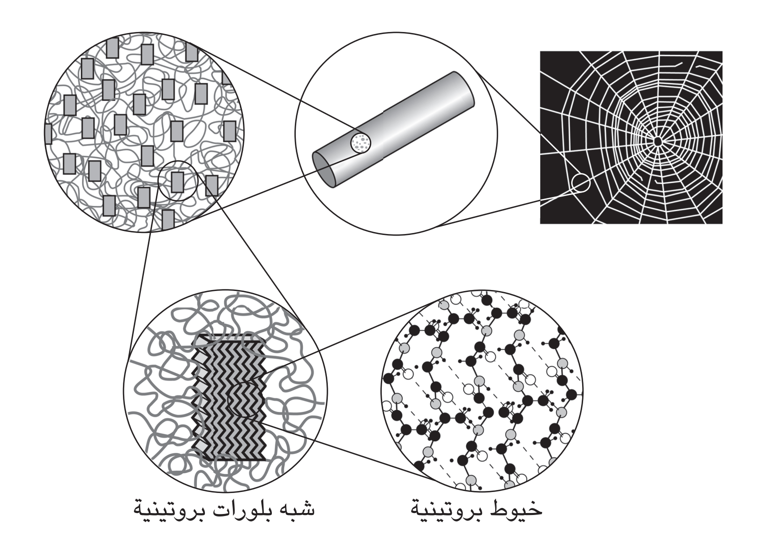
وتلك الملاءات المنتظمة والصلبة نسبيًّا يمكن أن تتكدس بعضها فوق بعض لتصنع شبه بلورات بروتينية دقيقة ثلاثية الأبعاد. في ألياف الحرير تكون شبه البلورات هذه مجهرية؛ إذ قد تمتد فقط لمسافة تساوي جزءًا من عشرين مليون جزء من المليمتر في أي اتجاه. وبعد المناطق شبه البلورية، تستمر السلاسل البروتينية لتشكل مناطق أقل تنظيمًا، تتشابك فيها معًا؛ ومن ثم يعد الحرير أشبه بتركيبة من بلورات دقيقة مبعثرة في أنحاء مادة بينية بروتينية أكثر مرونة؛ وهو يشبه العظم قليلًا، فيما عدا أن البلورات في حالة الحرير لا تكون من المعادن ولكن من البروتينات ذاتها.



شكل ٣-٣: يعد حرير العنكبوت واحدًا من أقوى المواد الليفية المعروفة.

توجد في المناطق البلورية من بروتين الحرير بصفة عامة تتابعاتٌ متكررةٌ بانتظام من الأحماض الأمينية؛ ففي ألياف شرنقة دودة الحرير من نوع «بومبيكس موري»، على سبيل المثال، يتكرر التتابع جلايسين-ألانين-جلايسين-ألانين-جلايسين-سيرين على طول السلاسل، وفي المناطق غير المنتظمة يكون التتابع غير منتظم.

ألياف الحرير غير قابلة للذوبان في الماء؛ إذ ستكون قليلة الفائدة لو كانت تذوب لمجرد تعرضها لندى الصباح. إلا أن العنكبوت تغزل خيوطها الحريرية من محلول مائي من جزيئات بروتينية؛ ومن ثم يتحقق ذلك العمل الإعجازي الفذ المتمثل في تحويل جزيء قابل للذوبان إلى جزيء غير قابل للذوبان في الماء. هذا التغيُّر في الذوبانية هو نتاج لتغيُّر في طريقة تكوين السلاسل عضويًّا؛ إذ تُنتج العنكبوت بروتين الحرير في غدده الحريرية، وفي هذه المرحلة يكون البروتين لا يزال قابلًا للذوبان في الماء، ويمر المحلول البروتيني المائي من الغدة متجهًا نحو مخرج في جسم العنكبوت يسمى «المغزال». في أثناء هذه الرحلة يفقد المحلول الحريري محتواه المائي ويصبح أكثر تركيزًا، وتبدأ السلاسل في الارتباط معًا بروابط هيدروجينية، وحين يغادر الحرير فتحة المغزال يكون معظم الماء قد تم التخلص منه وتشكِّل السلاسل ملاءات بيتا. وبمجرد أن تكون الجزيئات قد



شكل ٣-٤: هناك مستويات عدة فيما يختص بالبنية الهرمية للحرير؛ فعلى المستوى الجزيئي يتم تنظيم الحرير في شكل ملاءات بيتا منتظمة (شبيهة بالبلورات) تتكون من خيوط متوازية، وتدل الخطوط المتقطعة على الروابط الهيدروجينية.

تكدست معًا بإحكام في هذه المناطق البلورية، يصير من العسير على جزيئات الماء أن تنفذ فيما بينها؛ ولذا تكون ألياف الحرير صلبة بالضرورة ولا تذوب في الماء.

لم يستطع خبراء العلوم الجزيئية حتى الآن تصميم بوليمرات صناعية لها هذا النوع من البنية الهرمية؛ إذ إن من الصعب جدًّا التحكم في الطريقة التي تتكدس بها الجزيئات معًا على عدة مستويات مختلفة في وقت واحد. صحيح أن البنية الجزيئية للبوليمرات التخليقية — ما تحويه من ذرات وما تتصف به من نظام وترتيب في الفراغ — يمكن الآن تحديدها بدقة، إلا أن «برمجة» هذه الجزيئات لكي تتجمع مكوِّنة أنواعًا معينة من التشكيلات، أو لتترابط تقاطعيًّا عند مواقع معينة، هي أمر آخر.

ومع ذلك يَعرف كيميائيو البوليمرات الآن حِيَلًا كثيرة لإدخال خصائص معينة بطريقة هندسية في المواد التي يعالجونها بما يجعلها صلبة أو لينة، على سبيل المثال، أو قادرة على تكوين ألياف قوية. في عام ١٨٣٩ اكتشف تشارلز جوديير طريقة يستطيع

بها أن يحقق الترابط التقاطعي للجزيئات البوليمرية للمادة الصمغية المستخرجة من نوع من أشجار الغابات الاستوائية البرازيلية يسمى «هيفيا برازيليينزس»، عن طريق تسخين تلك المادة مع الكبريت. وهذه العملية المسماة «الفلكنة» هي عملية تقسية خاصة، تُحوِّل الصمغ اللين إلى ذلك الشكل المرن القابل للمط الذي نسميه «المطاط».

يتكون الصمغ المطاطي في معظمه من بوليمر هيدروكربوني يسمَّى بولي أيسوبرين، وهذا تتكون سلاسله فقط من ذرات كربونية مترابطة معًا، مع اتصال بعض ذرات الهيدروجين بها. والكثير من منتجات البلاستيك التي تصنع الآن على نطاق واسع، مثل البولي إيثيلين والبولي بروبيلين والبولي ستيرين، هي أيضًا بوليمرات هيدروكربونية صنعت من منتجات تكرير البترول. ولكن المطاط الخاص بإطارات الشاحنات مطاط طبيعي؛ إذ يبقى من الصعب جدًّا أن يُصنَع بطريقة تخليقية.

حتى منتصف القرن العشرين، كانت عملية ربط الجزيئات الهيدروكربونية الصغيرة معًا لصنع السلاسل البوليمرية التخليقية تتم عشوائيًّا؛ مما يُنتِج أنماطًا مختلفة كثيرة من السلاسل: فبعضها قصير، وبعضها طويل، وبعضها متفرع، وبعضها مستقيم. ولأن بنية السلاسل تحدد كيفية تكدسها معًا، ولأن هذا التكدس يحدد خصائص المادة المنتَجة؛ فإن هذا القصور في التحكم يعني أن كيميائيي البوليمرات لم يكن بوسعهم أن يفعلوا إلا القليل لضبط هذه الخصائص. وبينما يتيح التحكم البنيوي الدقيق للطبيعة صنع عدة مواد تبدو مختلفة من نفس المادة الخام، فإن الكيميائيين يحصلون على نفس نوع البلاستيك في كل مرة. ولكن في خمسينيات القرن العشرين، تم استحداث عوامل حفازة خاصة حققت تحكمًا أكبر في البنية الجزيئية للسلاسل، ومن ثم في طريقة تكدسها معًا؛ وهذا يعني على سبيل المثال إمكان تحضير البولي إيثيلين بشكل جديد صلب عالي الكثافة له مدًى أوسع من الاستعمالات، يتفوق بصفاته هذه على الشكل الأقدم، الأكثر ليونة والأقل كثافة، بما أتاح استعماله على سبيل المثال لصنع طبول صلبة، وزجاجات صلبة للتعبئة، أو مواسير وألواح صلبة في الإنشاءات وسائر الأغراض الهندسية.

هاتان الصورتان تختلفان في درجة الانتظام المتعلقة بتكدس السلاسل البوليمرية معًا؛ أيْ في درجة بِلَّوْرِيَّتِها. وكما هو الحال في الحرير، فإن زيادة درجة البلَّورِيَّة (أي درجة التبلور) تجعلها أكثر صلابة ومتانة، كما تجعل المادة أكثر كثافة وأقل ذوبانية، وهي صفات مستحبة للألياف القوية. وتنشأ القوة العالية لأن تكدُّس السلاسل الجزيئية بطريقة أكثر تقاربًا وانتظامًا يجعلها تتلاصق بشكل أكثر إحكامًا.

ومن ثم، فإن من التحديات الأساسية عند صنع ألياف بوليمرية صلبة تحسينَ اصطفاف الجزيئات؛ إذ إن تكوُّن أي بوليمر من جزيئات مستقيمة السلسلة (بمعنى أن تَكُون كل سلسلة على حدة مستقيمة غير متفرعة) يُكْسب هذا البوليمر القدرةَ على جعل السلاسل الجزيئية ككل تنتظم وتصطف معًا. ولكن في حالة الحرير يساعد على حدوث هذا ميلُ السلاسل للترابط معًا لصنع ملاءات بيتا البلورية. بتعبير آخر، السلاسل نفسها لديها نوع من «تعليمات التراصف» المبرمجة داخلها، فهل يمكننا صنع بوليمرات اصطناعية مثل هذه؟

نعم يمكننا هذا في الحقيقة؛ فالسلاسل البروتينية في الحرير تتراصف معًا بسببِ قوَى التجاذب بين الوحدات في السلاسل المختلفة، بما يتيح للسلاسل أن تتشابك معًا مثل «السحَّاب» المغلق، كما توجد علاقات مشابهة متبادلة بين سلاسل طائفة من البوليمرات التخليقية تعرف بالأراميدات، التي تصنع منها ألياف الكيفلر الشهيرة التي تنتجها شركة دوبون.

تعد ألياف الكيفلر من أفضل المواد المرشحة لربط محطة فضائية؛ إذ تمتاز بقوة شد توتري أكبر مما يتميز به الفولاذ، مع كونها أخف وزنًا بكثير. وتُستخدم هذه الألياف ضمن الحبل المقوَّى في الإطارات المطاطية، وكمادة أساسية في صنع الملابس الواقية من الرصاص، وكمادة مقوية في التركيبات الصلبة المستخدمة في الهندسة الجوية الفضائية، وحتى ككابلات محبوكة تُستخدم لتثبيت آلات الحفر والتنقيب عن البترول.

ولكن حتى عند المقارنة وزنًا بوزن، نجد الحرير لا يزال أقوى؛ فالدرجة العالية من تراصف السلاسل الجزيئية في الخيط الحريري لا تأتي فحسب من حقيقة أنها تترابط جزئيًّا في وجود المحلول، بل الأمر المهم — والأهم — هنا أن المحلول البروتيني أثناء تدفقه لأسفل خلال الممر الخارج من غدة الحرير في العنكبوت تجاه المغزال، تتراصف سلاسله البوليمرية في اتجاه تدفق السائل، تمامًا كما تدفع الريح الشعر وتجعله مشدودًا على استقامته. تحدث نفس العملية أيضًا أثناء إطلاق خيط الحرير من فتحة المغزال، وهي تسمى «التراصف المستحث قَصِّيًّا» (إذ إن السائل المتدفق يتعرض لما تسمى قوة القصِّ أو القوة القاصَّة).

وهكذا، رغم أن من الممكن صنع بروتينات شبيهة بالحرير بشكل اصطناعي، فإنَّ صنع خيوط حرير حقيقية منها هو أمر آخر تمامًا. فإذا أمكن بَثْق ليفةٍ ما بشكل ميكانيكي من محلول بروتين حريري (طبيعي أو اصطناعي) تمامًا مثل جذب خيطٍ ما

من غراء لزج، فلن تكون الليفة بنفس قوة الخيط الحريري الحقيقي ومتانته. ويعتقد بعض الباحثين أنه لن يكون بالإمكان الحصول على حرير اصطناعي يمكن مقارنته جيدًا بالمادة الطبيعية، إلا إذا أمكن صنع آلة دقيقة تضاهي مغزال العنكبوت لتنتج ذلك الحرير.

تستخدم حالة التراصف المستحث قصيًّا في عملية صناعية لإنتاج ألياف شديدة القوة من البولي إيثيلين؛ إذ تُسحب الألياف من مادة شبه هلامية ضمن خطوات معقدة تَنتج عنها درجة عالية جدًّا من التراصف للسلاسل البوليمرية. وهذه الألياف، التي تسمَّى أحيانًا «السلك الصاروخي»، هي أقوى حتى من الكيفلر، وهي — بخلاف الكثير من المواد العضوية — شديدةُ الثبات كيميائيًّا؛ مما يجعلها مناسبة أكثر لاستعمالها في الخيوط الجراحية الطويلة الأمد.

جينات المادة

ثمة طريقة لصنع بوليمر حريري اصطناعي؛ وهي أن نجلب جينات منتجة للحرير، وندخلها في البكتيريا باستخدام آليات تكنولوجية حيوية؛ فالحرير، تمامًا مثل أي بروتين آخر، يتم تشفيره جينيًّا في الدِّي إن إيه؛ إذ يتحدد تتابُع أحماضه الأمينية على طول السلاسل بواسطة تتابع مقابل من وحدات نيوكليوتيدية في أحد الجينات في كروموسومات العنكبوت. بتعبير آخر، العنكبوت لديها مخطط جزيئي لصنع البوليمر. (ولكن لاحظ كيف أنه بسبب تعقيدات عملية الغزل، لا يكون هذا المخطط وحده كافيًا لصنع خيوط حريرية جيدة!)

إن قدرة الكائنات الحية على تعيين التركيبة الجزيئية لبوليمر ما بدقة تامة هي قدرة مذهلة تحسد عليها. تتيح التكنولوجيات التخليقية الحديثة للكيميائيين قدرًا كبيرًا من التحكم في تركيبة سلسلةٍ ما؛ فعلى سبيل المثال يمكنهم صنع بوليمرات مهجنة عن طريق التطعيم بسلاسل جانبية من نوع كيميائي معين على سلسلة رئيسية من نوع آخر، أو عن طريق التبادل بين لَبِنات نوع معين من الوحدات، ولَبنات نوع آخر على طول سلسلة واحدة. ولكنَّ صُنع بوليمر ما قد يكون طوله آلاف الوحدات، وفيه تتكرر الكثير من الوحدات المختلفة في تتابع من التعقيد الاعتباطي — ولكن مع بقاء كل سلسلة جزيئية في المادة متطابقة — هو أمر بعيد للغاية عن قدراتنا التخليقية الحالية. وبتعبير لغوي مناظر، نقول إن أحدث ما لدينا من بوليمرات اصطناعية أشبهُ بأحرف منفردة مبعثرة، في حين أن البوليمرات الطبيعية تشبه الجُمَل الكاملة ذات المعنى.

تتيح التكنولوجيا الحيوية لنا التمكن من فصل الجينات من جزء من الدِّي إن إيه الخاص بأحد الكائنات ثم لصقها بالدِّي إن إيه في كائن آخر. والكائن المتلقي حينئذٍ (في حالة سير العملية على ما يرام) يعامل الجين الجديد كأنه يخصه هو، ويستخدم آليات ذلك الجين المتعلقة بالنَّسخ والترجمة لصنع البروتين المقابل. وإن من الآمال الواعدة المهمة، التي تعتبر من وجهة نظري أقل إثارة للجدل، في حقل التكنولوجيا الحيوية، أن يجري نقل جينات بشرية إلى البكتيريا، وهذه بدورها يمكن إكثارها في صهاريج تخمير لصنع البروتينات المطلوبة في الطب. ولكن بعض علماء البلمرة أدركوا أن هذا يعد أيضًا وسيلة لصنع مواد أساسها البروتينات.

وفضلًا عن نقل جينات الحرير الحقيقية إلى البكتيريا،[١] بإمكان المرء أن «يكتب» جينات اصطناعية، ويعبر عنها بهذه الطريقة؛ فمن الأمور المميِّزة للبروتينات البنيوية أن بها تتابعات من أحماض أمينية متكررة؛ إذ إن الألياف التي تشكلها تكون بصفة عامة متجانسة جدًّا على طول امتدادها. ومن السهل نسبيًّا صنع جينات تخليقية لها تتابعات متكررة؛ إذ يحتاج المرء فقط لصنع الوحدات المتكررة المفردة، ثم يُجري بعد ذلك ربط العديد منها معًا. (هناك طرق لضمان أن يكون الجين التخليقي الناتج لديه فقط عدد محدد من النسخ من الوحدات المتكررة.) وباستخدام هذه الفكرة، بدأ بعض الباحثين صنع مواد بروتينية بالأساس مهندَسة وراثيًّا تكون فيها السلاسل مبرمجة لكي تتبنى تراكيب معينة. ولقد صُنعت مواد شبه حريرية «مصممة» بهذه الكيفية، فضلًا عن مواد تخليقية ذات صلة بالبروتينات مشابهة للكولاجين والإيلاستين، وهذا الأخير هو بروتين مرن في الجلد. ويمكن تصور إنتاج مواد هجينة تُزَاوِج بين بروتين طبيعي (إنزيم على سبيل المثال) وبين سلسلة شبه بروتينية تخليقية صمِّمت لكي تسلك سلوك إحدى المواد؛ على سبيل المثال، كي تتكدس في شكل شبه بلورات من ملاءات بيتا غير القابلة للذوبان، والتي يمكن أن تشكِّل طبقة سطحية مضادة للماء. ومما يشجع على استخدام المواد شبه البروتينية في مجال التطبيقات الطبية هو أنها متوافقة حيويًّا وقابلة للتحلل حيويًّا.

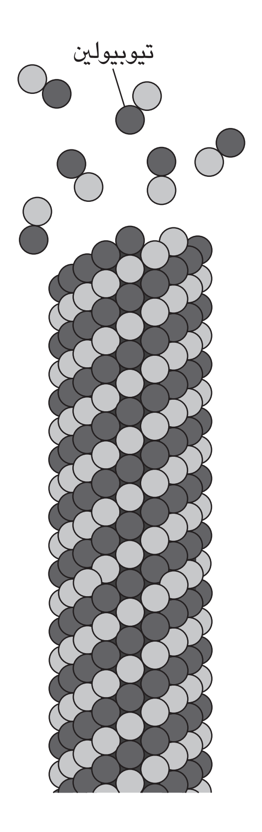
هيكل الخلية

توجد بالخلايا شبكة من الألياف، وهي أكثر صلابة من تلك البروتينات البنيوية التي تشبه الحبال، والتي تسمى الكولاجين والكيراتين. وشبكة الألياف المذكورة هذه تسمى

«الأنيبيبات الدقيقة»، وهي تُؤَمِّن مسارات شبه عصوية تنقل الآلات الجزيئية عن طريقها العبوات المطلوب نقلها في أنحاء الخلية. كما أن الأنيبيبات الدقيقة بمنزلة «سقالات» تستعين بها الخلية لتغير شكلها؛ فهي على سبيل المثال تتيح للأميبا أن تمد قدمًا من أقدامها الكاذبة. كما أن الزوائد الخلوية الشبيهة بالشعيرات، التي تسمى الأهداب، والتي تبرز من الخلايا الطلائية في القناة التنفسية للإنسان لتدفع المخاط الطارد للشوائب والميكروبات إلى خارج الجسم، وكذلك الأسواط التي تستخدمها البكتيريا لتدفع نفسها بحركات لولبية في سائلٍ ما؛ كل هذه أيضًا من الأنيبيبات الدقيقة.

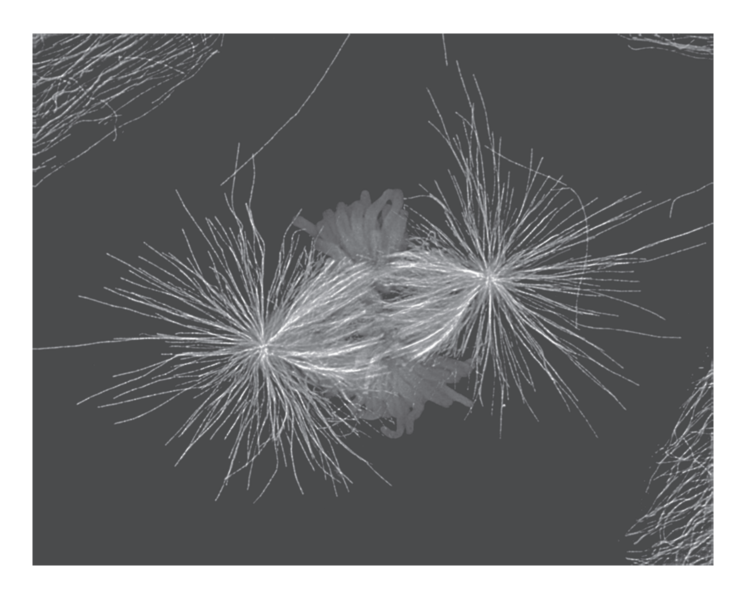
وكما يوحي اسمها، فإنها تراكيب أنبوبية دقيقة جوفاء. وهي مصنوعة من بروتين يسمى التيوبيولين (أي الأنيبيبين)، وهو ليس ليفيًّا في طبيعته ولكنه مدمج وكروي. ويتكون التيوبيولين من جزيئين اثنين متماثلين تقريبًا، وهما معًا يشبهان الدَّمْبِل، وتتلاصق وحدات البروتين هذه معًا مثل قوالب القرميد في مدخنة أسطوانية (شكل ٣-٥).

ووحدات التيوبيولين يمكن أن تلصق نفسها بنهايات الأنيبيبات الدقيقة أو تفصل نفسها عنها؛ وبهذه الطريقة تَطُول الألياف أو تقصر. تستطيع الأميبا أن تسحب «ساقها» ببساطة بأن تفكِّك الأنيبيبات الدقيقة التي دفعتها إلى الخارج قبل ذلك. وهذه السهولة في التجميع تمكِّن الأنيبيبات الدقيقة من أن تلعب دورًا رئيسيًّا في انقسام الخلية، فبمجرد أن تصنع الخلية المنقسمة نسخًا من كروموسوماتها، فإنها تُنتج مجموعتين من الأنيبيبات الدقيقة الشعاعية، تُسمَّيان «النجمين». وحين تتقابل الأنيبيبات الدقيقة المنبثقة من أحد النجمين مع تلك المنبثقة من النجم الآخر، فإنها تندمج عند نهاياتها، مكونة حزمة من الألياف العابرة كالجسر بين النقطتين البؤريتين للنجمين، وهذه الحزمة تسمى «مغزل الانقسام الفتيلي» (وتسمى عملية الانقسام الخلوي هذه الانقسام الفتيلي). تلتصق الكروموسومات بهذا المغزل ويجري فَصْلُها على حِدَة وشَدُّها للجانبين بحيث يُشد نصف عدد الكروموسومات نحو كلٍّ من القطبين (شكل ٣-٦)، وبهذه الكيفية يوفر مغزل الانقسام الفتيلي بنية يمكن بمقتضاها فصل المادة الوراثية المتضاعفة إلى مجموعتين كاملتين. بعد ذلك تتمدد الخلية عرضيًّا، وتنقسم إلى قسمين على الأساس الهيكلي للأنيبيبات الدقيقة، وكلٌّ من النصفين يحتوي على مجموعة كاملة من الكروموسومات.



شكل ٣-٥: تعتبر الشعيرات البروتينية الأنبوبية التي تسمى الأنيبيبات الدقيقة بمنزلة «السقالات» للخلايا.

وجدير بالذكر أن عقَّار التاكسول المضاد للسرطان (انظر الفصل الأول) يعمل عن طريق إعاقة عملية الانقسام الفتيلي؛ ومن ثم إيقاف تكاثر الخلايا السرطانية، فهو يعوق عملية تفكيك الأنيبيبات الدقيقة التي تعتبر ضرورية لها أثناء بحثها المحموم بعضها عن بعض من كلا النجمين. لسوء الحظ أن التاكسول له نفس التأثير على الخلايا السليمة، ولكن نظرًا لأن الخلايا السرطانية تنقسم بسرعة أكبر، فإنها تنال الضربة الأقوى من جانب هذا العقَّار.



شكل ٣-٦: يتكون مغزل الانقسام الفتيلي من الأنيبيبات الدقيقة، وهو يشكِّل هيكلًا يتم على أساسه ترتيب الكروموسومات (التي تبدو هنا في مركز الحزمة) وفرزها أثناء الانقسام الخلوي.

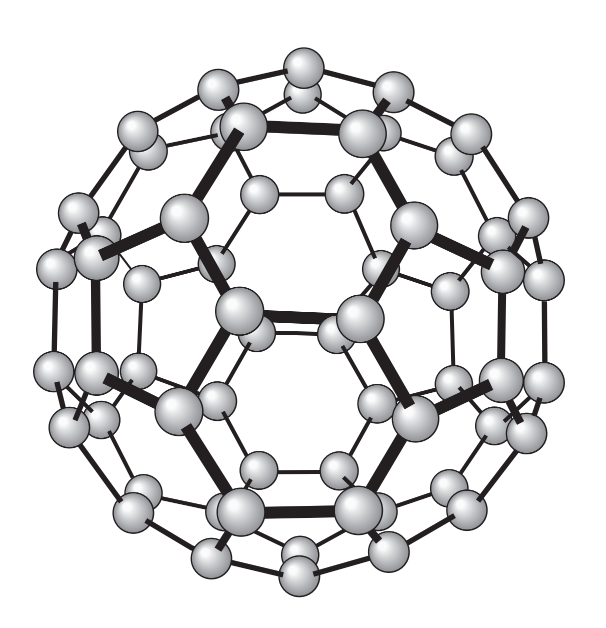
الأنابيب الكربونية

حتى حلول تسعينيات القرن العشرين، لم يكن ثمة تفكير، إلا القليل، في اتجاه فكرة صنع ألياف تخليقية قوية من جزيئات أنيبيبية؛ فمن السهل نسبيًّا أن تربط جزيئات صغيرة معًا في سلاسل، ولكن الأمر يصير أكثر صعوبة بكثير فيما يتعلق بالأنابيب.

ولكن في عام ١٩٩١ اكتشف خبير ياباني في علم المجاهر، يدعى سوميو إيجيما، يعمل في شركة إن إي سي بمدينة تسوكوبا نوعًا من الجزيئات الأنيبيبية يمكن بواسطتها صنع أقوى ألياف عَرَفَها الإنسان. وتلك التراكيب التي تسمى أنابيب النانو الكربونية يمكنها أن تجمِّع أنفسها من بخار من الكربون المفتت.

كان إيجيما يتقصى تكنولوجيا تُستخدم في صنع جزيئات كربونية تسمى «الفوليرينات»؛ حيث يجري ربط العشرات من ذرات الكربون معًا في شكل أقفاص

جزيئية جوفاء. وكان أول فوليرين مكونًا من قفص جزيئي من ستين ذرة، ويسمَّى «بكمينستر فوليرين»، واكتُشف في عام ١٩٨٥، واسمه العجيب هذا مشتق من اسم مهندس معماري أمريكي يدعى ريتشارد بكمينستر فولر، وهو الذي كان رائدًا لِمَا تسمى «القبة الجيوديسية» المكونة من سطيحات سداسية وخماسية. وقد اكتسب هذا البكمينستر فوليرين أو C_{60} التركيبَ عينه على المستوى الجزيئي؛ إذ يتألف من حلقات سداسية وخماسية الشكل مكونة من ست وخمس ذرات كربون على الترتيب، مرتبطة معًا في شكل قفص جزيئي كروي (شكل ٣-٧).



شكل ٣-٧: جزيء الكربون ٦٠ (C_{60}) كروي الشكل تقريبًا، ويتكون من حلقات سداسية وخماسية من ذرات كربونية.

وفي عام ١٩٩٠ اكتُشفت طريقة لصنع الفوليرينات بكميات كبيرة لأول مرة، وكانت تشمل إمرار شحنة كهربائية بين قضيبين من الجرافيت (الذي يُعَد كربونًا نقيًّا). أدت طاقة الشرارة إلى تبخير بعض الجرافيت، فارتبطت ذرات الكربون معًا عند تبريد البخار

مكونة الكربون ٦٠ وأقفاصًا كربونية أخرى. ولكن حين استخدم إيجيما الياباني ظروفًا مختلفة قليلًا في مولِّد الفوليرين الذي لديه، وجد شيئًا جديدًا حين فحص الفتات السناجي تحت المجهر الإلكتروني.

كان السناج ممتلئًا بجسيمات شبه إبرية، قُطْر كلٍّ منها نانومترات قليلة، ومع المزيد من دقة الفحص رأى إيجيما أنها عبارة عن أسطوانات دقيقة من الكربون، وأن كلًّا منها يحتوي على عدة أسطوانات يستقر بعضها داخل بعض كالدُّمَى الروسية (شكل ٣-٨). صارت هذه الأشياء تعرف بأنابيب النانو الكربونية. لم يظن أحد من قبل — حتى بعد اكتشاف الفوليرينات — أن ذرات الكربون يمكن أن ترتِّب نفسها تلقائيًّا بهذه الكيفية.



شكل ٣-٨: الطرف المستدق من أنبوبةٍ نانو كربونية كما تظهر في مقطع عرضي تحت المجهر الإلكتروني.

تتكون جُدُر أنابيب النانو من الكربون النقي الذي تترتب ذراته في شكل ملاءات من حلقات سداسية، وهي نفس بنية الجرافيت، فيما عدا أنه في أنابيب النانو تكون الملاءات ملتفَّة في هيئة أسطوانات، وعند طرفَي الأنبوبة تلتوي الملاءات في شكل أغطية طرفية مسطحة. إننا في العادة نَعتبر الجرافيت مادة ضعيفة، وهو على أي حال يُستخدم في صنع أقلام الرصاص؛ لأن جَرَّه على الورق يزيل منه بعضًا من الكربون الأسود، ولكن

هذا الضعف هو نتيجة لأن الملاءات المسطحة من الكربون يكون ارتباط بعضها ببعض ارتباطًا رخوًا، لدرجة أنها يمكن أن تنزلق بعضها فوق بعض. أما الملاءات المفردة التي تكون فيها الذرات مرتبطة بإحكام، فيُتوقع أن تكون شديدة القوة بقدر يضاهي الماس في واقع الأمر. وحين تكون هذه الملاءات شبه الجرافيتية مرتبطة معًا جزئيًّا بروابط كيميائية، كما هي الحال في ألياف الكربون التقليدية، فإن المادة تكتسب نصيبًا كبيرًا من القوة والصلادة.

تعتبر أنابيب النانو الكربونية ذروةَ ما تم التوصُّل إليه من ألياف الكربون؛ إذ تتكون الأنابيب من ملاءات لا تنفصم من كربون شبيه بالجرافيت. يُتوقع أن تكون لها قوة توترية (شدِّية) أكبر من الماس، وأكبر أيضًا من ألياف الكيفلر، ومن الحرير، أو أي ألياف أخرى طبيعية أو اصطناعية قد تخطر على بالك. وقد أدرك هذا الأمرَ عالِمٌ يُدعى ريتشارد سمولي من جامعة رايس بمدينة هيوستون الأمريكية — وهو أحد مكتشفي الفوليرينات — فافترض أنه لو أمكن بناء ما يسمى «مصعد الفضاء»، فبإمكان أنابيب النانو الكربونية أن تثبته بالأرض!

ولكن توجد عقبة هنا؛ فحتى الآن لا يمكن تكبير حجم أنابيب النانو إلى طول يزيد عن كسر من المِّليمتر، وهذا لا يعد طولًا كبيرًا، كما أن قياس القوة الحقيقية يكون أمرًا صعبًا، وإن كانت بعض التجارب على المستوى المجهري قد أكدت، بشكل غير نهائي، أن هذه الأنابيب قوية وصلدة جدًّا بالفعل. (هل في مثل قوة الماس وصلادته؟ لا يزال هذا غير مؤكد.)

وحتى يمكننا صنع كابلات مفيدة من أنابيب النانو الكربونية، يلزمنا أن نستحدث طريقة للتحكم في تكبيرها وتنميتها بحيث يمكن تمديدها على طول المدى. في مجال تخليق البوليمرات العادية هناك تكنولوجيا تسمَّى «البلمرة الحية» تسمح لنمو السلسلة بأن يتوقف مؤقتًا، ثم يبدأ من جديد حسب الرغبة، حتى يمكن إلصاق المزيد والمزيد من الوحدات بالسلاسل المستمرة في الاستطالة. وإذا تمكن أحدٌ من أن يستحدث عملية مماثلة لأنابيب النانو الكربونية، فسيكون هذا فتحًا ثوريًّا. ولكن حتى الآن لا نملك سوى فهمٍ مشوشٍ لكيفية نمو الأنابيب؛ مما يجعل من العسير أن نعرف كيفية التحكم بها.[٢] وفي الوقت الحاضر، يتعين على مصعد الفضاء أن ينتظر.

هوامش

(١) هناك أيضًا أبحاث مستمرة للحصول على بروتين حريري من لبن الماعز، عن طريق نقل جينات الحرير إلى الماعز.

(٢) ثمة خطوة أولى تجريبية اتخذها باحثون فرنسيون، هم فيليب بولان ورفاقه، في جامعة بوردو بمدينة بيساك؛ إذ صَنَعَ هذا الفريق أليافًا وأشرطة من أنابيب النانو عن طريق حَقْن أنابيب نانو، معلقة في الماء بفعل جزيئات شبيهة بالصابون، في بوليمر سائل لزج. اصطفَّت أنابيب النانو عند حقنها من أحد الشعيرات الدقيقة، بما يشبه — إلى حد كبير — ما يَحدث لبروتينات الحرير؛ إذ تصطفُّ وتتراصف أثناء مغادرتها مغزال العنكبوت. وتتلاصق الأنابيب المصطفَّة معًا في هيئة ألياف يمكن أن يتم تجفيفها وتداولها. ولكن هذه الخيوط ليست مصنوعة من أنابيب نانو «متواصلة»؛ ومن ثم فليست حتى الآن في مثل قوة الألياف الكربونية التقليدية، فضلًا عن الماس.

الفصل الرابع

في مسألة الأيض: الجزيئات والطاقة

تخيل لو كانت السيارةُ ذاتُ المحرك مثلَ جسم الإنسان؛ بحيث لا تستمر في السير بسرعتها القصوى إلا لمسافات قصيرة فحسب، وهكذا لا يستطيع سائقها أن يقودها على الطريق بسرعة تزيد عن ٨٠ ميلًا في الساعة مثلًا (لنَقُل هذا بأمانة)؛ إذ لن يستطيع عمل ذلك إلا في رحلة مسافتها نصف ميل إلى بعض المحال التجارية. وكلما تَعيَّن عليه القيادة لمسافة أبعد، صار عليه أن يسير بسرعة أبطأ، حتى لا تُستهلك السيارة سريعًا. (لعلك قدتَ أنت أيضًا، مثلي، سيارات لها تلك الصفات!)

من السطح، نقول إن السيارات والبشر أكثر تماثلًا مما قد يتخيل المرء، ولكن ليس للأسباب التي قد يفترضها فلان أوبريان؛[١] فكلٌّ منهما يحصل على طاقته بحرق الوقود الغني بالطاقة في وجود الأكسجين، وكلٌّ منهما يطلق عادمًا من ثاني أكسيد الكربون، إلا أن السيارات لا تتعب إذا تحركت بسرعة مقاربة لسرعتها القصوى لفترات طويلة من الزمن، فما دمتَ تعيد ملء خزان الوقود، فبإمكان السيارة أن تنطلق إلى ما لا نهاية. أما البشر فلا يستطيع أيٌّ منهم العَدْو بسرعة كبيرة لمسافة طويلة كمسافة الماراثون بكاملها، حتى لو كانوا يتناولون الجلوكوز باستمرار أثناء الجري؛ فما السبب يا ترى؟

هذا السؤال يقودنا إلى الآليات الجزيئية التي تُشغِّل الجسم، والتي تُعرف بالعمليات الأيضية. بطرق كثيرة، يكون الأيض وليس التضاعف التكاثري هو ما يعطي أفضل تعريف عملي للحياة. قد يقول علماء البيولوجيا التطورية إننا نعيش كي نتكاثر. ولكن الحقيقة غير ذلك؛ فالبشر لا يحاولون التكاثر طوال الوقت، حتى أكثرهم إقبالًا على المغامرات الغرامية. ولكن لو توقفت أجسادنا عن الأيض، ولو لدقيقة واحدة أو اثنتين، فسنقضي نَحْبنا لا محالة.

جسَّ يدك تجدها دافئة (فإذا لم تجدها كذلك، فجرِّب إبطيك أو لسانك)؛ ففي المعتاد تكون أجسادنا أدفأ من الوسط المحيط بها. وسواء أكُنَّا مستيقظين أم نائمين تبقى أجسامنا محتفظة بدرجة حرارة طبيعية تعادِل ٣٧ درجة مئوية تقريبًا. وهناك وسيلة وحيدة فقط لتحقيق هذا، وهي أن تستمر خلايانا في إنتاج الحرارة باعتبارها ناتجًا ثانويًّا للأيض. فليست الحرارة هي المقصد هنا، ولكنها مجرد أمر لا سبيل لتجنبه؛ لأن كل ما يحدث من تحوُّل للطاقة من صورة لأخرى يبدد بعضًا من الحرارة بهذه الكيفية. وعملياتنا الأيضية معنية أساسًا بصنع الجزيئات، فلا تستطيع الخلايا أن تبقى على قيد الحياة دون أن تستمر في إعادة بناء نفسها؛ إذ تصنع أحماضًا أمينية جديدة للبروتينات، ودهونًا جديدة للأغشية الخلوية، وأحماضًا نووية جديدة حتى يمكنها أن تنقسم. ولا يمكن أن تتوقف عجلات الخلية عن الدوران ما دمنا أحياءً، ودوران العجلات يستهلك طاقة.

ومن ثم فإن مجتمع الخلية يشبه الرؤية التقليدية للمجتمع إبان الثورة الصناعية؛ إذ تسوده ثقافة التصنيع، ويُكرَّس جانب كبير من قوة العمل لتوليد الطاقة. هناك المئات، بل الآلاف من مصانع الطاقة في كل خلية من خلايا أكبادنا؛ حيث يكون إنتاج الطاقة على أشُده، وهي تشبه الطواحين الشيطانية السوداء في رواية ويليام بليك «أورشليم»؛ إذ تنتج نفايات إلى جانب الأشياء المفيدة، إلا أن الخلايا لديها بصفة عامة سبل أكثر فعالية لضمان عدم تلويث نفسها.

ولأن إنتاج الطاقة ضروري للحياة، يمكن أن تكون دراسة آليات الأيض أمرًا مقلقًا، فإننا نرى كم أن الحياة هشة، فإذا فسدت هذه العملية الحيوية أو تلك، فسيتعطل نظام الجسم كله، تمامًا كما تقوم بِنيتُنا الاجتماعية على أساس عدم توقف الإمداد بالكهرباء والغاز (ناهيك عن الهواء النقي والماء الكافي). وإنها لشهادة على القدرة الإبداعية للتطور أنه استطاع أن يشكل آلة (وأستميحك عذرًا عن هذا التشبيه المجازي التنويري) لها من قوة البأس ما يجعلها تدور لثمانية عقود تقريبًا — بمشيئة الله — قبل أن تصاب أجزاؤها بالتعطل أو العطب المستديم.

في نيران الطاقة

ولكن دعنا نبدأ بشيء من التبسيط، أو على الأقل بما يبدو لنا نوعًا من التبسيط. في خمسينيات القرن التاسع عشر ألقى العالم البريطاني مايكل فاراداي في المعهد الملكي

بلندن سلسلة من المحاضرات عن «التاريخ الكيميائي لشمعة». فلقد شاء أن يبيِّن أنه في ضوء لهب الشمعة المتوهجة يستطيع المرء أن يقرأ العلم الكيميائي بكامله كما كان مفهومًا وقتئذٍ، بل وما هو أكثر من الكيمياء؛ إذ قال: «ليس هناك باب أفضل، أو أكثر رحابة، تستطيع منه أن تدخل إلى دراسة الفلسفة الطبيعية.»

بالنسبة إلى العين المدربة، من شأن أي ظاهرة طبيعية أن تعمل عمل حبة الرمل في قصة ويليام بليك؛ بأن تكون نافذة إلى الكون اللانهائي. وستفعل الشمعة هذا لا سيما في لندن القرن التاسع عشر، حين لم يكن يتعين على المحاضرات أن تكون مبهرة بصريًّا. في الحقيقة أنا لا أعرف تفاصيل كيفية عمل محرك الاحتراق الداخلي، ولكني أعرف أنه لا يختلف كثيرًا عن كيفية احتراق الشمعة، فهو يَستخدم الأكسدة — أي خليطًا من بعض الوقود القابل للاشتعال مع الأكسجين الموجود في الهواء لإنتاج الحرارة — ومن ثم في حالة الشمعة إنتاج الضوء.

وحتى احتراق شمع البرافين هذا، لا يزال غيرَ مفهوم من حيث جميع تفاصيله المعقدة، ومن المؤكد أن هناك الكثير من الأوجه المهمة في هذه المشكلة التي لم يعرفها فاراداي، إلا أن فكرة الاحتراق هي فكرة جميع العمليات الكيميائية التي تولِّد الطاقة. وأقول — بادئ ذي بَدء — إنها عملية انحدارية.

تلك هي النقطة الحاسمة في التغير الكيميائي، وفي جميع عمليات التغير الأخرى في الكون؛ إن لها اتجاهين: انحداري وتصاعدي، ومن الطبيعي أنها تتقدم في الاتجاه المنحدر. ما الذي يحدد هذا الأمر؟ في نهاية المطاف، إنه ذلك الشيء شبه الغامض المسمَّى الإنتروبيا (التي هي مقياس للطاقة في أي نظام ديناميكي حراري). وهنا نقابل القانون الثاني للدِّيناميكا الحرارية الذي لا يستطيع أحد أن يستأنف حكمه، والذي يقضي بأنه في جميع عمليات التغيير، تزداد الإنتروبيا الكلية للكون.[٢]

إن الثقافة العامة تعتبر الإنتروبيا معادلة للفوضى، مع أنها ليست شيئًا سيِّئًا؛ فالإنتروبيا في أي نظام هي مقياس لعدد الطرق التي يمكن بمقتضاها أن يعاد تشكيل أوضاع الذرات دون أي فارق ملحوظ. إذا جاء شخصٌ ما إلى مكتبي، وأعاد خلط فوضى أوراقي إلى أكوام مختلفة، فمن المحتمل أنني لن ألاحظ هذا، ولكن إذا أعاد ترتيب جميع الأوراق إلى منظومة ملفات منظمة بعناية، وهو ما كان مجرد حلم لي، فسرعان ما سأدرك هذا التغيير. وبصفة تقريبية أقول إن الأنظمة المنضبطة لها أشكال غير مميزة أقل — أيْ تتسم بدرجة إنتروبيا أقل — مما هو الحال في الأنظمة الفوضوية.

ومن ثم فالقانون الثاني هو بالفعل تعبير عما يلي: من المحتمل أكثر أن تتقدم منظومةٌ ما من حالة أكثر انضباطًا إلى أخرى أقل انضباطًا؛ فقط لأن هناك المزيد من الحالات الأخيرة مقارنة بالأولى. وحين يتعامل المرء مع أنظمة تحتوي على تريليونات لا حصر لها من الجزيئات، تتحول هذه القضية الاحتمالية إلى شبه يقين. ويُعد القانون الثاني قانونًا لمجرد أن انتهاكه أمر غير مرجح لدرجة كبيرة للغاية.

ولكن بطبيعة الحال أحيانًا ما تتجه الأمور بالفعل إلى المزيد من النظام؛ فبخار الماء يتكثف إلى رقاقات ثلجية متناسقة سداسية الرءوس، ويمكننا أن نخرج ونرتب كومة من الحجارة لنشكل منها منزلًا، ولا يُقبَض علينا لانتهاك القانون الكوني. هذا الأمر صحيح، ولكنه لا يمثل انتهاكًا لمبدأ أن الإنتروبيا لا بد أن تزداد؛ لأن القانون الثاني ينطبق على الكون إجمالًا. فمن الممكن الحصول على النظام، ولكن على حساب زيادة في الفوضى في موضع آخر؛ مما يتعذر تعويضه. وفي العادة، يُدفَع هذا التعويض في صورة حرارة. نعم يمكننا أن نبني حائطًا بالعمل اليدوي الشاق، ولكن حين نفرغ سنكون قد أطلقنا من الحرارة الجسدية ما يكفي لزيادة الحركات الحرارية الفوضوية للأوساط المحيطة بنا، وبما يكفي لأن تبقى كفة الإنتروبيا راجحة؛ فالنظام يُكتسب من خلال الفوضى.

تحافظ الخلايا الحية على نظامها في مواجهة مقتضيات الإنتروبيا. وقد أدى هذا بعالِم الفيزياء إرفن شرودنجر لأنْ يفترض في كتابه «ما هي الحياة؟» أن الجواب يكمن في المفهوم الغائم إلى حدٍّ ما «الإنتروبيا السلبية»، التي تستخلصها الكائنات الحية من الأوساط المحيطة بها. يبدو هذا بما يثير الشك أشبه بمذهب حيوي أُلبس ثوب الدِّيناميكا الحرارية، ولا يزال المرء يصادف اليوم كلامًا عن الإنزيمات «كأدوات مضادة للإنتروبيا». ولكن لا شيء خاصٌّ أو غامضٌ فيما يتعلق بآليات الحياة، ولْتَجِسَّ يدك (أو إبطك أو لسانك) مجددًا، فأنت حين تقوم بهذا لا تفعل شيئًا سوى ضخ بعض الإنتروبيا إلى بيئتك.

قلتُ سابقًا إن التغير الكيميائي له اتجاه انحداري، ولكن أحيانًا ما يبدو في اتجاه تصاعدي. وتعتبر الإنزيمات بصفة خاصة بارعة في توجيه الجزيئات تصاعديًّا، رغم أن هذا يمكن أن يحدث في العالم غير الحي كذلك. ولكن في هذه الحالات يتم دفع هذا الانعكاس في الاتجاه بعملية انحدارية أكثر نشاطًا؛ إذ يمكنك أن تجذب جسمًا ما لأعلى منحدر إذا ربطته — عن طريق بكرة — بجسم ثقيل الوزن يتحرك لأسفل المنحدر. وهكذا يرتفع الثقل الأخف وزنًا مع نزول الأثقل. وعلى حد قول الكيميائي بيتر أتكنز:

«عند فهم الكيمياء الحيوية ... نسعى خلف الأوزان الثقيلة التي تعمل على نحو بارع من خلف شاشات خفية غامضة.»

يتعلق إنتاج الطاقة في الكيمياء الحيوية لدرجة كبيرة برفعِ أكبرِ قدرٍ ممكن من الأوزان لأعلى قبل أن يصل وزن ثقيل واحد إلى نهاية سقوطه. بالنسبة إلى الحيوانات، وكذلك البشر، يكون هذا الوزن الثقيل هو الطاقة المختزنة في الجزيئات (الغذائية) التي نأكلها.

أو يمكننا تشبيه الأمر بمحاولة ترويض أحد الأنهار للحصول على الطاقة الكهرومائية؛ فالماء سيواصل السقوط مهما فعلنا له، ولن يرتفع من تلقاء نفسه لأعلى الجبل، ويكون هدفنا إذن أن نغتنم أكبر قدر ممكن من طاقة المسقط المائي. ويُعَد هذا أحد الفروق الأساسية بين محطات توليد الطاقة بجسم الإنسان وبين لهب الشمعة مثلًا، فحين يشتعل شيءٌ ما تكون النار خارج نطاق السيطرة، وكل ما نحصل عليه هو الضوء والحرارة، ولكن في أجسامنا يحدث الاحتراق في شكل تتابُع — متدرج ومُسيطَر عليه بإحكام — من الخطوات، ويتم سحب بعض الطاقة الكيميائية وتخزينها في كل مرحلة.

السكر المحترق

تحرق محطة الطاقة وقودًا مثل الفحم أو البترول أو الغاز، ولكن هذا الاحتراق أكبر بكثير من كونه موقدًا مشتعلًا على نطاق كبير؛ فهو مجرد وسيلة لها غاية؛ إذ تُستخدم الحرارة في تحويل الماء إلى بخار، ويعمل ضغط البخار على دفع التوربينات؛ فتدور التوربينات وتدور معها ملفات سلكية بين أذرع مغناطيسات هائلة مما يُنتج تيارًا كهربائيًّا يسري في الأسلاك. وتتبدل الطاقة؛ من كيميائية إلى حرارية إلى ميكانيكية إلى كهربائية. ولكل منشأة صناعية ترسانة هائلة من الآليات التنظيمية وآليات السلامة؛ فهناك فحوصات يدوية لأجهزة قياس الضغط وللسلامة التركيبية للأجزاء المتحركة، كما توجد أجهزة استشعار أوتوماتيكية لإجراء القياسات؛ فالأجهزة الآمنة من الإخفاق تجنبنا أخطاءً كارثية.

وعملية توليد الطاقة في الخلية تشبه تلك العملية في تعقيداتها، ولا يمكن بوصف مختصر أن نوفي تلك المنظومة الرائعة حقها بشكل عادل؛ إذ تبدو الخلية كأنها تفكر في كل شيء، وأن لديها أدوات بروتينية للضبط الدقيق لكل شيء.

المدخلات الرئيسية للاحتراق هي الوقود والأكسجين، وبالنسبة إلى الخلايا هي الغذاء وهواء التنفس. فإذا حُرمت الخلايا من الأكسجين فإن لهيبها ينطفئ. وربما نحرق الغذاء حرقًا طفيفًا قبل أن نبتلعه، وهذا يتم بعمليات الطهو وتجهيز الطعام التي تنتج مركَّبات تسعد حاسة الذوق لدينا. ولكن كل شيء نأكله من قطعة الشوكولاتة إلى ورقة السبانخ إلى شريحة اللحم يجب أن يتكسر، ويتفكك إلى وقود أكثر تجانسًا. وهذا يحدث من خلال الهضم؛ حيث تقوم الإنزيمات في المعدة والأمعاء بتحليل مأكولاتنا إلى مكوناتها الجزيئية الأساسية.

توجد تشكيلة من المكونات الغنية بالطاقة في الطعام، وهذه يمكن تصنيفها أساسًا إلى الكربوهيدرات والدهون والبروتينات؛ أما الكربوهيدرات فهي بوليمرات تتكون من جزيئات من سكر الجلوكوز ترتبط معًا في سلاسل طويلة، وأما الدهون (الشحوم) فيمكن أن تتحلل إلى جزيئات تسمى الأحماض الدهنية والجلسريدات الأحادية (مثل الجلسرول) أثناء العملية الهضمية. تنتج الدهون قدرًا من الطاقة يزيد بمرتين عما تنتجه كتلة مماثلة من الكربوهيدرات، ويحصل القلب منها على ٦٥ بالمائة من طاقته.

الجلوكوز إذن هو أحد أبطال الوزن الثقيل الأساسيين في عالم الأيض، وتدفع عملية حرق الجلوكوز، التي تحفزها الإنزيمات، إلى تكوين جزيئات من مادة غنية بالطاقة تسمى ثلاثي فوسفات الأدينوسين (إيه تي بي)، وهذه تستخدم في تشغيل عمليات أخرى في الخلية، وهي مادة كيميائية حيوية معبأة بالطاقة، ويحتاج الكثير من التفاعلات الإنزيمية الكبيرة إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين لرفعها صعودًا.[٣] ويعد ثلاثي فوسفات الأدينوسين المفتاح إلى صيانة سلامة الخلية وتكوينها العضوي؛ ومن ثم تبذل الخلية قدرًا كبيرًا من جهدها لإنتاج أكبر كمية ممكنة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين من كل جزيء من الجلوكوز تحرقه. ويتم حفظ حوالي ٤٠ بالمائة من الطاقة المنطلقة من حرق الطعام في جزيئات ثلاثي فوسفات الأدينوسين.

وجزيء ثلاثي فوسفات الأدينوسين، غني بالطاقة لأنه يشبه زنبركًا ملتفًّا، ويحتوي على ثلاث مجموعات من الفوسفات، ترتبط معًا مثل عربات قطار، وكلٌّ من تلك المجموعات الفوسفاتية مشحون بشحنة سالبة؛ وهذا يعني أنها تتنافر فيما بينها. ولكن لأنها ترتبط معًا بروابط كيميائية قوية التأثير، فلا تستطيع الهروب بعضها من بعض. وفي محاولتها الهروب، تحشد المجموعات الفوسفاتية تلك كمية كبيرة من الطاقة.[٤]

يمكن فصل الروابط بين المجموعات الفوسفاتية في تفاعل يشمل الماء؛ ولهذا السبب يسمَّى التحليل المائي (أي «التفكيك بالماء»). وكل مرة يحدث فيها تحلل لإحدى الروابط

بالماء يحدث انطلاق للطاقة، ويؤدي إطلاق سراح مجموعة الفوسفات الخارجية إلى تحويل ثلاثي فوسفات الأدينوسين إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين (إيه دي بي)، وإذا انشقت عنها مجموعة فوسفات ثانية، فإن المركَّب يتحول إلى أحادي فوسفات الأدينوسين، وهاتان العمليتان الفاصلتان للروابط تنطلق منهما كميتان مكافئتان من الطاقة.

الهضم الجيد

تبدأ عملية تفكيك الطعام بمجرد دخوله الفم؛ إذ يحتوي اللعاب على إنزيمات هاضمة تسمى إنزيمات الأميلاز التي تبدأ في تفكيك بوليمرات الكربوهيدرات إلى جلوكوز؛ ولهذا السبب يبدأ المرء في الإحساس بأن الطعام صار أحلى مذاقًا بعد مضغه. في الخضراوات تتركب الكربوهيدرات القابلة للهضم في معظمها من النشا، ويعتبر السليولوز الموجود في جُدُر الخلايا النباتية من البوليمرات الجلوكوزية، ولكنه مقاوم لهجوم إنزيمات الأميلاز.

وفي المعدة، يتلقى الطعام معالجة أكثر شدة، فهنا يحدث إفراز لحمض الهيدروكلوريك الذي يجعل للعصائر المَعِدِيَّة خاصية أكَّالة مثل حمض البطاريات. ويعمل الحمض المَعِدي على تفكيك لفات البروتينات الجزيئية التي في الطعام؛ مما يجعلها مهيأة للتفكيك بفعل إنزيم يسمَّى الببسين.

إلا أن المعدة في حقيقتها ما هي إلا حجرة تخزين للطعام غير المهضوم؛ إذ تبدأ عملية التفكيك الفعالة في الأمعاء الدقيقة؛ حيث تدفع إليها المعدة بمحتوياتها، وتمتزج بالعصارة المعوية تشكيلة من إنزيمات قوية دقيقة متخصصة في أعمال الهدم. فبينما تهاجم إنزيماتُ الأميلاز الكربوهيدراتِ، تحلِّل إنزيماتٌ أخرى ما في الطعام من بروتينات ودهون وأحماض نووية، ثم يتم امتصاص الفتات المهضوم من خلال بطانة الأمعاء، لِيَمُرَّ إلى الأوعية الدموية والليمفاوية، التي توزع هذه المواد الغذائية إلى أنحاء الجسم. وتتشكل هذه البطانة من ثنيات دقيقة وبروزات مجهرية أصبعية الشكل تسمى «الزغب الدقيق»، الذي يزيد مساحة سطح الأمعاء كثيرًا جدًّا لضمان امتصاص المواد الغذائية بكفاءة. ولو بسطنا سطح الأمعاء الدقيقة في الإنسان لوجدنا أنها تغطي مساحة ملعب تنس.

تُنتَج الإنزيمات الهاضمة في البنكرياس، وهي غدة ذات قنوات تصب في الأمعاء الدقيقة. ولكن جزيئات تلك الإنزيمات القوية يجري بناؤها لكي تفكك نفس الجزيئات التي صُنعت منها خلايانا ذاتها، فكيف يتأتى ألا تدمر أنسجتنا؟

يتم تصنيع الإنزيمات مع ارتباطها بمقبض أمان جزيئي يجعلها غير نشطة. في صورتها تلك تسمى «مولدات الإنزيم»، ولا تنفك عنها أداة الأمان هذه (التي تتركب من جزء من سلسلة بولي ببتيدية) إلا حين تصل إلى الأمعاء أو المعدة، ويحدث هذا من قِبَل إنزيم آخر بُنِيَ لهذا الغرض. تغطي بطانةَ القناة الهضمية المعوية طبقةٌ من المخاط، تحميها من الإنزيمات الهاضمة. ولو صارت تلك الطبقة الواقية رقيقة جدًّا، لاستطاعت العصائر الأكالة أن تؤثر في الأنسجة المكشوفة، فتحدث القرحة.

يجري تفكيك محتويات المعدة على مدى ساعات عدة بعد تناول الوجبة، ولكن الجسم يحتاج للتزود بالوقود حتى بعد اكتمال الهضم؛ لذا فإنه يكدس مخزونات بالجسم حتى يمكنه أن يسحب منها عند اللزوم. يتكون حوالي عُشر كتلة الكبد وحوالي ١ بالمائة من كتلة العضلات من مادة تسمى الجلايكوجين، وهو بوليمر جلوكوزي متماسك وشديد التفرع. وتعكف خلايا الكبد والعضلات على صنع الجلايكوجين من بعض السكر الذي تستقبله، فتخزنه في شكل حبيبات صغيرة، قُطر كلٍّ منها حوالي واحد على أربعة آلاف من المليمتر، وتلك هي غرف خزانة المؤن الخاصة بالخلية.

لو هبطت كمية السكر في مجرى الدم لما دون مستوًى معين، فسيعرف الجسم أن الوقت قد حان ليبدأ السحب من مخازن الجلايكوجين، فانخفاض مستويات السكر يحفز على تكوين هرمونين في البنكرياس، هما الجلوكاجون والإبينفرين، اللذان يخبران الخلايا بأن تبدأ في تحليل ما فيها من جلايكوجين إلى جلوكوز.

أما الزيادة الكبيرة للسكر في الدم فتطلق منظومة تحذيرية مختلفة، تحث على تكوين هرمون في البنكرياس يسمى الإنسولين، والإنسولين هو بمنزلة إشارة للخلايا لكي تبدأ في تحويل الجلوكوز إلى جلايكوجين؛ أي تخزينه بدلًا من حرقه. والإنسولين باعتباره دلالة على وجود فيض من الوقود في الدم، يعطي أيضًا إشارة للخلايا لكي تركز على عملية التصنيع، على سبيل المثال صنع البروتينات والدهون (وهما يشكلان مخزون وقود آخر للطوارئ) بدلًا من توليد الطاقة.

والإنسولين هرمون ببتيدي (يشبه البروتين)، ويتم تشفيره وراثيًّا. وقد يحدث خلل شائع نسبيًّا في الرسالة الجينية يؤدي إلى إنتاج جزيء سابق على تكوين الإنسولين (ويسمى البروإنسولين؛ أيْ ما قبل الإنسولين)، لا يستطيع الإنزيم التصنيعي للإنسولين تحويله إلى الإنسولين ذاته بالطريقة الطبيعية. ويعد هذا الإخفاق في صنع الإنسولين أحد الأسباب الرئيسية لداء البول السكري؛ ويعني أن المرضى بهذا الداء يتعين عليهم أن يتلقوا جرعات منتظمة من هرمون الإنسولين لتنظيم مستويات السكر في دمائهم.

دورات ودورات

تجري عملية حرق السكر على مرحلتين، تبدآن بتحويله إلى جزيء يسمى البيروفات في عملية تُعرف بالتحليل السكري (أو «انشقاق السكر»). تشمل هذه العملية تتابعًا من عشر خطوات تحفزها الإنزيمات، وتعمل الخطوات الخمس الأولى منها على شق الجلوكوز إلى نصفين في عملية تصاعدية، يشغِّلها استهلاك جزيئات ثلاثي فوسفات الأدينوسين؛ بحيث تقل شحنة الطاقة في جزيئين منها متحولين إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين مقابل كل خطوة شق لجزيء من الجلوكوز. ولكن تحول فتات الجلوكوز الناتج إلى بيروفات هي عملية انحدارية تسمح لثلاثي فوسفات الأدينوسين بأن يتكون من جديد من ثنائي فوسفات الأدينوسين، ويتم صنع أربعة جزيئات من ثلاثي فوسفات الأدينوسين بهذه الكيفية، بحيث يكون ثمة مكسب إجمالي مقداره جزيئين اثنين من ثلاثي فوسفات الأدينوسين مقابل كل جزيء يُستهلك من الجلوكوز. وهكذا تشحن عملية التحليل السكري بطاريات الخلية.

بعد ذلك يدخل البيروفات المرحلة الثانية من عملية الاحتراق؛ وهي دورة حمض الستريك، التي تتطلب الأكسجين. ولكن لو كان الأكسجين شحيحًا — أي في الأحوال اللاهوائية — يجري تنفيذ خطة طارئة؛ حيث يتحول البيروفات إلى جزيء اللاكتات.[٥] ويحدث هذا على سبيل المثال إذا كنا نمارس مجهودًا مضنيًا لدرجة تجعل معدل الإمداد بالأكسجين غير قادر على أن يجاري معدل التحليل السكري، الذي يزيده الجسم للوفاء باحتياجات الطاقة العالية. ومع تراكم اللاكتات في الأنسجة العضلية فإنه يسبب تلك الأعراض المؤلمة من «الوخز».

الأيض اللاهوائي وسيلة غير فعالة نسبيًّا للحصول على طاقة الجلوكوز؛ ولذا سرعان ما يؤدي المجهود الشاق إلى الإجهاد العضلي؛ إذ تُستهلك الطاقة بأسرع مما يتم توليدها، بغض النظر عن كمية الجلوكوز المتاحة. وهذا الأمر هو الذي يحد من سرعة عدَّائي المسافات القصيرة. أما عدَّاءو المسافات الطويلة فيتخذون سرعة جري مستمرة بحيث يمكن أن تأخذ عملية الأيض الهوائية (التي تستخدم الأكسجين) بكاملها مجراها عن طريق دورة حمض الستريك.[٦]

تجري هذه العملية في الميتوكوندريا، تلك العضيئات أو الحجيرات السجقية الشكل الموزعة بالمئات الكثيرة في كل خلية بشرية (شكل ٤-١). وأول شيء يفعله الميتوكوندريون هو أن يحول البيروفات إنزيميًّا إلى جزيء يسمى أسيتيل مساعد الإنزيم أو الأسيتيل كو

إيه. ويعمل تفكُّك الأحماض الدهنية والجلسريدات من الدهون أيضًا على توليد الأسيتيل كو إيه.



شكل ٤-١: الميتوكوندريا حجيرات مستقلة بذاتها داخل الخلايا. وهي مسئولة عن توليد الطاقة.

ودورة حمض الستريك هي تتابُع من ثمانية تفاعلات تحفزها الإنزيمات، تحول الأسيتيل كو إيه أولًا إلى حمض ستريك؛ ومن ثم إلى جزيئات أخرى مختلفة، انتهاءً بجزيء يسمى الأوكسالو أسيتات. وهذه النهاية هي بداية جديدة؛ إذ يتفاعل الأوكسالو أسيتات مع الأسيتيل كو إيه لصنع حمض الستريك. وفي بعض خطوات الدورة يتولد ثاني أكسيد الكربون كناتج ثانوي، وهو يذوب في مجرى الدم ويُحمل معه إلى الرئتين ليُطرد مع هواء الزفير، وهكذا نجد في الواقع أن الكربون الذي كان في جزيئات الجلوكوز الأصلية ينتهي به الحال إلى المنتج النهائي، وهو ثاني أكسيد الكربون، مكملًا بهذا عملية الاحتراق.

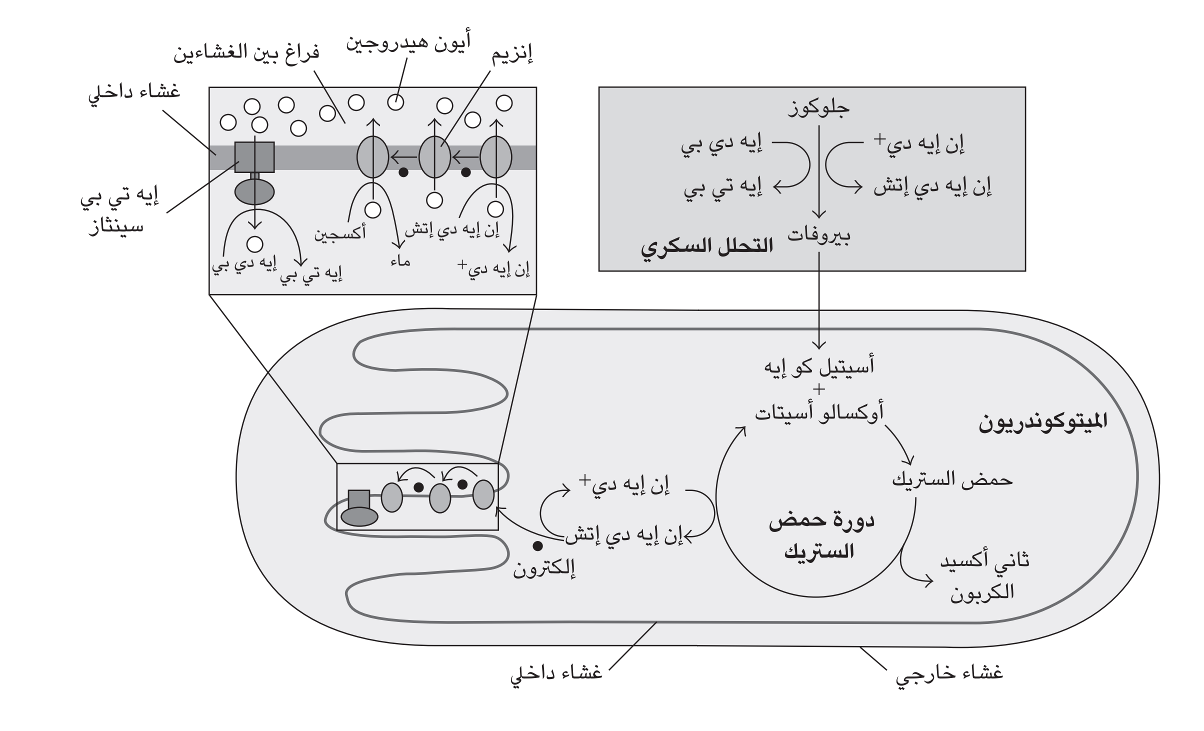
كذلك تنطلق من هذه الدورة إلكترونات. ونقول على سبيل التقريب إن دورة حمض الستريك ترسل تيارًا كهربائيًّا إلى جزء مختلف من الميتوكوندريون، وتُستخدم هذه الإلكترونات في تحويل جزيئات الأكسجين وأيونات الهيدروجين الموجبة الشحنة إلى ماء،

وهي عملية مطلِقة للطاقة، ويتم اقتناص الطاقة واستخدامها في صنع ثلاثي فوسفات الأدينوسين بوفرة.

لا تتدفق الإلكترونات وكأنها تسري في سلك معدني، بل يحملها جزيء يسمى ثنائي نيوكليوتيد أدينين النيكوتيناميد (إن إيه دي)، ويضيف اثنان من التفاعلات في دورة حمض الستريك إلكترونًا وذرة هيدروجين إلى أيون موجب الشحنة من الإن إيه دي محولًا إياه إلى جزيء يسمى إن إيه دي إتش، وهو الحامل للإلكترونات. ويبدأ نقل الإلكترونات من جزيئات الإن إيه دي إتش إلى جزيء أكسجين عملية تكوين الماء من الأكسجين والهيدروجين، مع إعادة توليد الإن إيه دي. وهذا يعود مجددًا إلى دورة حمض الستريك (شكل ٤-٢).

وهناك المزيد من الدورات داخل الدورات. إن الإن إيه دي إتش لا يمنح إلكتروناته مباشرة للأكسجين، ولكن هذه العملية الانحدارية تجري في مراحل عدة، وكلٌّ منها يُدفَع إلى شحن بطاريات الميتوكوندريون. يحيط بالميتوكوندريون غشاءٌ خارجي منفذ نسبيًّا؛ من خلاله تدخل المكونات الخام التي تزوِّد دورة حمض الستريك بالوقود، وغشاء داخلي غير منفذ، شديد الالتواء، ومرصَّع بجزيئات إنزيمية. وفي داخل الغشاء الداخلي يتخلى الإن إيه دي إتش عن إلكتروناته إلى واحد من تلك الإنزيمات الغشائية؛ ومن ثم تنقل الإلكترونات إلى سلسلة من بروتينات أخرى، وفي النهاية تصل الإلكترونات إلى بروتين غشائي يسمى أوكسيداز السيتوكروم سي، الذي لديه موقع لربط جزيئات الأكسجين، وهو الإنزيم الذي ينقل في نهاية الأمر الإلكترونات إلى الأكسجين.

وموقع ربط الأكسجين هذا في إنزيم أوكسيداز السيتوكروم سي يمكن أن يربط جزيئات — أو أيونات — صغيرة أخرى معينة بقوة أشد حتى من قوة ربط الأكسجين؛ مثل السيانيد وأول أكسيد الكربون، وإذا حدث هذا فلن تستطيع الإلكترونات بعدها أن تصل إلى الأكسجين؛ ومن ثم يتوقف هذا الجزء من الآلية عن الدوران، ويؤدي تعطُّل هذه العجلة الدوارة إلى تعطُّل آلية الميتوكوندريون ككل — أي إن دورة حمض الستريك تتوقف — ولن تكون هذه المنظومة بعدها قادرة على إنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين، ويحدث إنهاك للخامات الأساسية الموجودة خلال دقائق؛ ولذا يعتبر السيانيد وأول أكسيد الكربون من السموم الناقعة، التي يمكن أن تسبب الموت السريع بالاختناق. ونفس الشيء ينطبق على أي مواد تعطل البروتينات الداخلة ضمن سلسلة نقل الإلكترونات من الإن إيه دي بي إلى أوكسيداز السيتوكروم سي، وتتضمن هذه المواد بعضًا من أشد السموم فتكًا؛ فهذا الجزء بالذات من الآلية الخلوية المنتجة للطاقة حساس لأي هجوم.



شكل ٤-٢: يتم إنتاج الطاقة في الخلية من حرق السكر في خطوتين: التحليل السكري ودورة حمض الستريك. الخطوة الأولى هي تتابع خطي من التفاعلات، أما الثانية التي تحدث داخل الميتوكوندريون، فيمكن اعتبارها سلسلة من التفاعلات المتشابكة المتداخلة.

تعمل البروتينات الغشائية في سلسلة نقل الإلكترونات على تمرير محصولها انحداريًّا إلى التالي في الخط، وتستخدم بعضًا من الطاقة المنطلقة في ضخ أيونات الهيدروجين من داخل الغشاء الداخلي إلى خارجه. وهكذا، مع تقافز الإلكترون من أحد البروتينات إلى الذي يليه يزداد تركيز أيونات الهيدروجين في الحيز الموجود بين الغشاءين الداخلي والخارجي.

وهذا التزايد يشبه شحن البطارية، وذلك الفارق في تركيز أيونات الهيدروجين عبر الغشاء، وما يترتب عليه من فارق في الشحنة الكهربائية بين المنطقتين، يشبه الفارق في الجهد الكهربائي — أي هبوط الفولطية — الذي بين قطبَي البطارية. أو يمكنك النظر إلى البروتينات الغشائية بوصفها مضخات تدفع الماء رجوعًا لأعلى الجبل كي تصل إلى خزان يمكن استخلاص الطاقة منه بترك الماء يسقط لأسفل مجددًا.

يقوم خزان أيونات الهيدروجين بدفع عملية تركيب ثلاثي فوسفات الأدينوسين في الميتوكوندريون عن طريق تشغيل أداة تشبه كثيرًا عجلة مائية مصغرة. تتدفق أيونات الهيدروجين عائدة عبر الغشاء الداخلي من خلال بروتين غشائي يسمى إنزيم سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين، الذي يستغل الطاقة في صنع ثلاثي فوسفات الأدينوسين من ثنائي فوسفات الأدينوسين (شكل ٤-٢). ولدى سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين مكونان؛ فقاعدته المبيتة في الغشاء عبارة عن قناة أسطوانية يمكن أن تتدفق أيونات الهيدروجين من خلالها، وعند نهاية هذه القناة التي تفتح في داخل الغشاء الداخلي يلتصق تركيب بروتيني دائري يحتوي على ست وحدات صغيرة مستديرة مرتَّبة في شكل حلقة. ومع مرور أيونات الهيدروجين يدور هذا «الرأس» الدائري، ومع كل دورة يصنع المزيد من ثلاثي فوسفات الأدينوسين. ويعد سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين هو لب الآلة الخلوية المولدة للطاقة، وقد أدى توضيح تركيبته وشرح الكثير عن آلية عمله على يد كلٍّ من بول بيور وجون ووكر وينز سكو إلى فوزهم بجائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٩٩.

وهكذا، فإن عملية التحليل السكري، ودورة حمض الستريك هما نوعان متباينان للغاية من العمليات الأيضية؛ فإحداهما لا هوائية والأخرى هوائية. تعتبر عملية التحليل السكري مستقلة بذاتها لدرجة كبيرة؛ إذ تحتاج إحدى خطواتها إلى الإن إيه دي، الذي يُصنَع عادة ضمن دورة حمض الستريك، ولكن يمكن بدلًا من ذلك توليده مجددًا لا هوائيًّا عن طريق تحويل البيروفات إلى لاكتات. تبدو العمليتان لدرجة كبيرة مثل نوعين مستقلين من المسارات الأيضية مجتمعين سويًّا.

وهما كذلك بالفعل. يعتقد العلماء أن الميتوكوندريا كانت في الماضي السحيق كائنات بكتيرية منفصلة، وهي نظرية تدعمها الحقيقة القائلة إن لديها الدِّي إن إيه الخاص بها، والمتميز عن «المكتبة» الجينية الرئيسية التي في نواة الخلية (انظر الفصل الثاني). ومن المعتقد أنه منذ نحو مليارَي عام دخلت الميتوكوندريا في علاقة تكافلية (أي اعتمادية تعاونية) مع كائنات وحيدة الخلية كان الأيض لديها لا هوائيًّا باستخدام المسار التحليلي السكري.

في هذا الزمن تقريبًا، أدى انتشار الطحالب الخضراء (وهي من النباتات البدائية) إلى زيادة حادة في كمية الأكسجين في جو الأرض، وقبل تلك الآونة كان ثمة القليل نسبيًّا من الأكسجين في الهواء، وكانت البكتيريا الشبيهة بالميتوكوندريا قادرة على «تنفس» الأكسجين باستخدام دورة حمض الستريك. وقد نشأ التكافل بين الخلايا اللاهوائية والخلايا الهوائية لأن اللاهوائيات كانت تصنع البيروفات، الذي كانت الهوائيات تستخدمه للوقود، بينما أنتجت الهوائيات الإن إيه دي للمساعدة على دفع عملية التحليل السكري لدى اللاهوائيات. وفي نهاية الأمر ابتلعت اللاهوائيات تلك الكائنات الهوائية لتتحول إلى خلايا مفردة مركَّبة تتنفس الأكسجين. وبقية القصة — كما يقولون — هي من التاريخ المعروف.

أما الفطريات — كالخميرة — فلم تتخذ هذه الخطوة مطلقًا، فلا تزال من اللاهوائيات التي تحلل السكر وتعيش عليه. ولكن خلايا الخميرة بدلًا من أن تحول البيروفات إلى لاكتات فإنها تحولها إلى إيثانول. تلك هي عميلة التخمر، التي منها نشأ فهمنا كله للنشاط الإنزيمي. وهذه العملية تولد أيضًا غاز ثاني أكسيد الكربون، الناتج النهائي لعملية الاحتراق، الذي تنطلق فقاقيعه من صهاريج التخمير في أنحاء العالم.

شيءٌ ما في الهواء

يدخل الأكسجين الجسم من خلال الرئتين، ولكنه ليس شديد الذوبان في الدم؛ ومن ثم لا يمكن حمله إلى الميتوكوندريا اعتمادًا على ذوبانيَّته. (على عكس ذلك فإن ثاني أكسيد الكربون له درجة ذوبانية تكفي لجعله يشق طريقًا من الخلايا خلال مجرى الدم وصولًا إلى الرئتين). يُحمَل الأكسجين بواسطة خلايا الدم الحمراء المعبأة بذلك النوع من الجزيئات البروتينية المسمى الهيموجلوبين، الذي يتميز بشراهة قوية للأكسجين. وخلايا الدم الحمراء مُسخَّرة تمامًا لأداء وظيفتها تلك. فهي، خلافًا لسائر الخلايا، لا تحتوي

على دي إن إيه ولا آر إن إيه، ولا أجزاء مقسمة، ولا إنزيمات أخرى تقريبًا؛ فهي أساسًا أكياس من الهيموجلوبين. فجميع الآلات الجينية والإنزيمية اللازمة لصنع هذا البروتين تُطرد خارج الخلية في اللحظة الأخيرة السابقة على نضجها.

جدير بالذكر أن لون الدم الأحمر مشابه لِلَون الصدأ، الذي هو سمة مميزة للحديد. وفي قلب جزيء الهيموجلوبين تقع ذرات الحديد، مثبتة في مصائد جزيئية محكمة، تسمى البورفيرينات، وهذه البورفيرينات المعبأة بالحديد تُعرف بمجموعات «الهيم»، وهي تمتص الضوء الأخضر المزرقَّ بشدة؛ ولذا تبدو حمراء زاهية. يحتوي كل جزيء من الهيموجلوبين على أربع مجموعات من الهيم؛ حيث توفر ذرات الحديد مواقع ارتباط لجزيئات الأكسجين.

والهيموجلوبين، باعتباره ناقلًا للأكسجين، يجب أن يكون قادرًا على ربط حمولته بإحكام، على أن يكون قادرًا على إطلاق سراحها مجددًا، فكيف يمكنه أن يفعل كلا الأمرين؟ يَستخدم الهيموجلوبين حيلة ماهرة غالبًا ما تُستخدم حين يتعين على البروتين أن يعدل سلوكه بمجرد أن يربط جزيئه المنشود. ويمكننا القول ببساطة إن كل جزء من البروتين يمكنه أن «يَشعر» بما يجري في جزء آخر.

في الأوعية الدموية بالرئتين، حيث يكون الأكسجين وفيرًا، يُصدر ارتباط جزيء من الأكسجين بمجموعة من الهيم تنبيهًا من خلال البروتين الذي يحث مجموعات الهيم الثلاث الأخرى على أن تلتقط الأكسجين كذلك. يتخلى الهيموجلوبين عن أكسجينه أساسًا في الأنسجة العضلية؛ حيث ينقل جزيئات الأكسجين إلى الميوجلوبين، وهو بروتين آخر رابط للأكسجين، بل إن له ميلًا أشد للارتباط بالأكسجين. وبمجرد أن يؤخذ جزيء الأكسجين من الهيموجلوبين، تحدث «هزة» عكسية ترخي قبضة مجموعات الهيم الثلاث الأخرى على حمولتها، فتطلق الأكسجين بسهولة أكبر، وتلك «الهزات» — وهي بفعل تغيرات صغيرة ولكن مهمة، في الشكل المنثني للسلسلة البروتينية — تسمى «الحركات التفارغية».

جميع الفقاريات وكثير من اللافقاريات يُنقَل الأكسجين في أجسامها باستخدام الهيموجلوبين، رغم أن الشكل المحدد للبروتين يختلف بين الأنواع المختلفة منها. تَستخدم المفصليات والرخويات نوع بروتين آخر رابط للأكسجين يسمى الهيميرثرين، الذي يحتوي أيضًا على الحديد ولكنه لا يوجد ضمن مجموعة هيمية. والهيميرثرين له لون قرنفلي مائل للبنفسجي حين يُشحن بالأكسجين، ولكنه يصير عديم اللون حين يفقده.

بعض اللافقاريات البحرية تستخدم معدنًا فلزيًّا آخر لنقل الأكسجين، ويسمى البروتين الرابط للأكسجين لديها الهيموسيانين، ولونه أزرق؛ مما ينم عن وجود فلز النحاس فيه. وتلك الحيوانات هي ذوات الدم الأزرق الحقيقية في البحار والمحيطات.

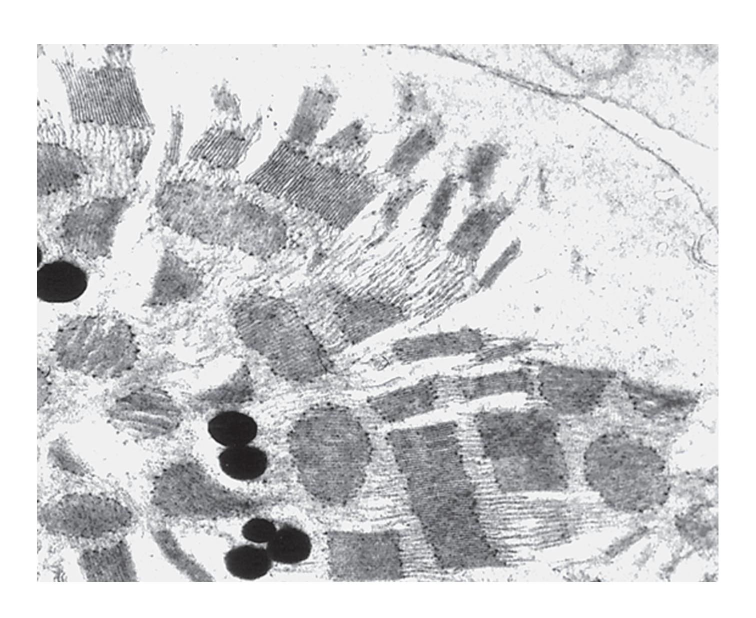
الطاقة في ورقة النبات

إن جوَّ الأرض الغني بالأكسجين هو نتيجة لنشاط النباتات، وهو يعد ناتجًا ثانويًّا لعملية التمثيل الضوئي، التي هي الاستخدام البيولوجي لطاقة الشمس في صنع جزيئات مادية. ونظرًا لوقوع النباتات والبكتيريا الممارسة للتركيب الضوئي عند قاعدة الهرم الغذائي، فإن جميع صور الحياة على الأرض تقوم بالأساس على طاقة الشمس. فلولا النباتات لهلكنا؛ إذ سنُحرَم حينئذٍ من رغيف عيشنا اليومي، وتهلك ماشيتنا جوعًا في مراعيها القاحلة.

التمثيل الضوئي عملية بيولوجية موغلة في القدم؛ إذ كانت الطحالب تمارس تلك العملية منذ ما لا يقل عن ثلاثة مليارات ونصف المليار سنة، حين كانت قارات العالم حديثة التشكُّل ولم تكتسِ بالخضرة بعدُ. كانت هذه الكائنات هي أول المخلوقات الذاتية التغذية (أو «الذاتيات التغذية») تصنع جزيئاتها من أشياء لا تزيد عن الضوء والماء والكربون الموجود في الهواء إلا قليلًا. وبمقتضى هذه العملية يُسحب نحو ٦٠ مليار طن من الكربون كل عام من ثاني أكسيد الكربون الجوي ليُحوَّل إلى كتلة حيوية غنية بالطاقة. وبعضٌ من هذه الكتلة الحيوية نأكله أو نحرقه أو نُدخله في تصنيع المنازل والمناضد أو نطعمه للحيوانات أو نصنع منه الورق، أو ننسج منه الملابس. وكثير منها يتساقط فتحلله الكائنات الدقيقة لينطلق مجددًا إلى الجو كمركَّبات كربونية طيارة. وعلى مدى الزمن الجيولوجي، يُدفن بعضه، وينضغط متحولًا إلى فحم، أو يتحلل متحولًا إلى نفط أو غاز طبيعي.

تعتمد عملية التمثيل الضوئي على جزيئات تتفاعل مع الضوء، فتمتصُّ بعضًا من طاقته، وتُدخله في عمليات كيميائية. وإذا كانت خلايا الحيوانات الثديية لديها مصانع لحرق الوقود في صورة ميتوكوندريا، فإن مراكز الطاقة الشمسية في خلايا الأوراق النباتية هي حجيرات تسمى البلاستيدات الخضراء (صانعات الكلوروفيل أو اليخضور) (شكل ٤-٣). والعملية التي تتم هنالك هي، بصفة عامة، عكس عملية أيض الجلوكوز؛ إذ تأخذ البلاستيدة الخضراء ثاني أكسيد الكربون والماء وتصنع منهما السكر. يُعَد

«حرق» الجلوكوز عملية انحدارية من منظور الطاقة؛ ومن ثم يُعَد تصنيع الجلوكوز في التمثيل الضوئي عملية تصاعدية؛ ولهذا يحتاج النبات إلى طاقة أشعة الشمس لإنجازها. إلا أن النبات لا يستخدم هذه الطاقة لمجرد إنتاج الجلوكوز الذي يُدخله في تشكيل الجُدُر السليولوزية لخلاياه، وإنما يحتاجه أيضًا — وبنفس الدرجة من الأهمية — في صنع جزيئات ثلاثي فوسفات الأدينوسين لشحن الآلية الكيميائية للخلايا.



شكل ٤-٣: تلتقط النباتات أشعة الشمس، وتحولها إلى طاقة كيميائية في البلاستيدات الخضراء، التي تمتلئ بتلك «الملاءات» أو اللويحات المكدسة التي تسمى «الأغشية الثايلاكويدية».

هناك أوجُه تَشابُه عدة بين عمليتَي الأيض الهوائي والتمثيل الضوئي؛ فكلتاهما تتكونان من عمليتين جزئيتين محددتين لهما أصول تطورية منفصلة؛ وهما عبارة عن تتابع خطي من التفاعلات مقرون بتتابع حلقي لإنتاج الجزيئات التي تحتاجها هاتان العمليتان. ويتمثل الجسر الواصل بين عمليتَي التحليل السكري ودورة حمض الستريك في جزيء الإن إيه دي الناقل للإلكترونات؛ يتم وصل العمليتين الفرعيتين في

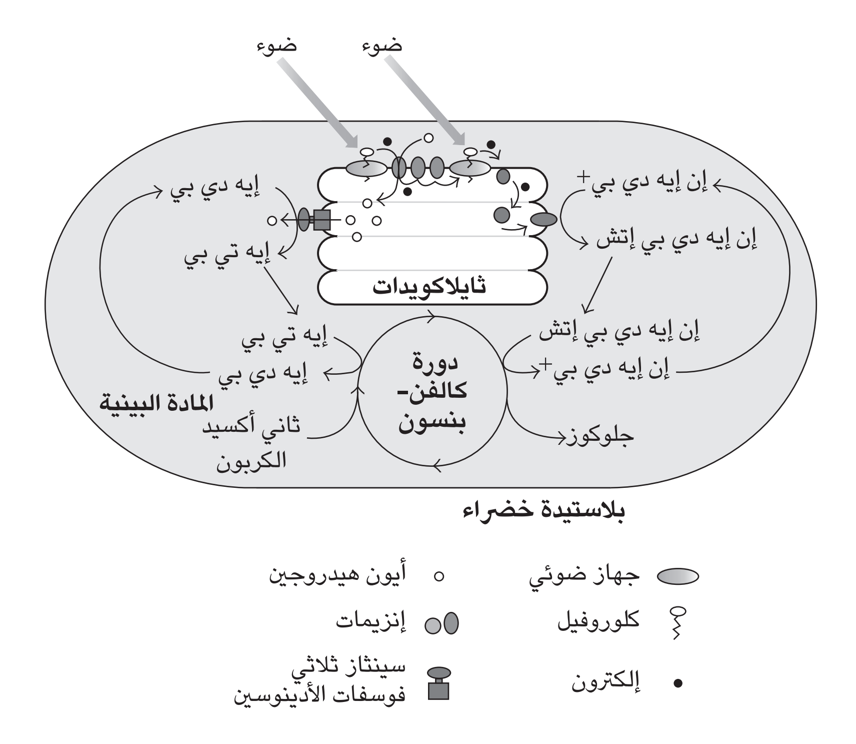
التمثيل الضوئي عن طريق دوران جزيء مماثل تقريبًا، هو فوسفات الإن إيه دي (إن إيه دي بي).

في الجزء الأول من عملية التمثيل الضوئي يُستخدم الضوء في تحويل الإن إيه دي بي إلى حامل للإلكترونات (هو الإن إيه دي بي إتش)، وفي تحويل ثنائي فوسفات الأدينوسين إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين. هذه عملية شحن فعالة تشحن البلاستيدة الخضراء، وتمهدها لتركيب الجلوكوز. وفي الجزء الثاني يُستخدم ثلاثي فوسفات الأدينوسين والإن إيه دي بي إتش في تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى سكر في تتابع حلقي من الخطوات يسمى دورة كالفن-بنسون (شكل ٤-٤).

تجري العملية الأولى عند سطح غشاء متعدد الطيات داخل البلاستيدة الخضراء، يسمى الغشاء الثايلاكويدي. وكل غشاء ثايلاكويدي على حدة يكون مرصعًا بمجموعات من الجزيئات التي تسمى «الأجهزة الضوئية»، توجد فيها جزيئات ممتصة للضوء تسمى «الأصباغ الضوئية»، وهي التي تبدأ التفاعلات التي تدار بطاقة الضوء. وفي قلب كل جهاز من الأجهزة الضوئية، وهو ما يسمى «مركز تفاعل التمثيل الضوئي»، يقع جزيء يسمى الكلوروفيل أ. وهذا الجزيء يمتص الضوءين الأحمر والأزرق بقوة، مُبقيًا على الضوء الأخضر؛ ومن ثم يكون مسئولًا عن اللون الأخضر لأوراق النبات كما نراه بأعيننا.

حين يستقبل الكلوروفيل الطاقةَ الضوئية، فإنه يصبح «مُثارًا»، مثل شجرة تفاح حين تهزها. والكلوروفيل في حالته المُثارة تلك يكون أقل قدرةً على التمسك بإلكتروناته الخارجية، فيتحرر أحدها، وهذا الإلكترون المتحرر يتم إمراره لأحد الإنزيمات. وبمجرد أن يكتسب الإنزيم إلكترونَين من الكلوروفيل «المهتز» يكون بإمكانه أن يحوِّل أيونًا موجب الشحنة من الإن إيه دي بي إلى إن إيه دي بي إتش، وحينئذٍ يتم تعويض الكلوروفيل ذي الإلكترون الناقص بإلكترونات أُخذت من جزيئات مائية في تفاعل آخر مُدار بالطاقة الضوئية. يجري تكسير الماء إلى أيونات هيدروجين وأيونات أكسجين وتتحد ذرات الأكسجين المفردة في جزيئات يتكون كلٌّ منها من ذرتين من الأكسجين، وهذه يطلقها النبات من خلال فتحات في سطح ورقته تسمى الثغور.

أما الإلكترون المأخوذ من الماء فيتم إمراره إلى الكلوروفيل على طول سلسلة من الجزيئات المطمورة في الغشاء الثايلاكويدي، وكل خطوة نَقْل هي عملية انحدارية تطلق طاقة، وبعضٌ من تلك الطاقة يحث على ضخ أيونات الهيدروجين إلى الفراغ الداخلي للغشاء الثايلاكويدي، وهذا الاختلال في التوازن يتم استغلاله حينئذٍ كمصدر للطاقة من



شكل ٤-٤: أثناء عملية التمثيل الضوئي تُستخدم الطاقة الشمسية الملتقطة في شق جزيئات الماء وصنع ثلاثي فوسفات الأدينوسين، الذي يحرك عملية تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى جلوكوز.

جانب جزيئات سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين المبيتة في الغشاء، والتي تؤدي عملها الدوار كالطاحونة في تحويل ثنائي فوسفات الأدينوسين إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين.

إلا أن مهمة التمثيل الضوئي لا تنتهي بمجرد شق جزيئات الماء وإنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين كمصدر للطاقة والإن إيه دي بي إتش كمصدر للإلكترونات، بل إن هذين المكونين يتم إطلاقهما إلى السائل الموجود خارج الغشاء الثايلاكويدي، الذي يسمى «المادة البينية»؛ حيث يحفزان تفاعلات دورة كالفن-بنسون التي تحول ثاني أكسيد الكربون إلى سكر. تسمى هذه العمليات «التفاعلات المظلمة»؛ لأنها لا تحتاج إلى

الضوء مباشرة. وفي عام ١٩٦١ نال الكيميائي الأمريكي ملفين كالفن جائزة نوبل بسبب استنتاجه لمعظم هذا التتابع من التفاعلات.

يهتم الكيميائيون في الوقت الحالي بتصميم أنظمة جزيئية اصطناعية تتشبَّه بالبلاستيدات الخضراء من حيث استخدام ضوء الشمس لتحفيز عملية التركيب الكيميائي. وقد عمل فريق في جامعة ولاية أريزونا الأمريكية على محاكاة البلاستيدة الخضراء في تراكيب تخليقية تشبه الخلية شكلًا (وحجمًا) تسمى الأجسام الدهنية (أو الليبوسومات)؛ وهي عبارة عن أغشية كروية مجوفة مصنوعة من جزيئات دهنية. وقد طعَّم الباحثون الأغشية الليبوسومية بتجميعات جزيئية مصممة تمارس نفس مهمة مراكز تفاعلات التمثيل الضوئي، مستخدِمة طاقة الضوء لضخِّ أيونات الهيدروجين في داخل تجاويف الليبوسومات.

وقد أدخل الباحثون جزيئات سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين في الليبوسومات، وهذه تطلِق أيونات الهيدروجين وتصنع ثلاثي فوسفات الأدينوسين. وهم يأملون في إمكان استغلال الطاقة المختزنة في ثلاثي فوسفات الأدينوسين لأغراض التخليق الكيميائي، على سبيل المثال لإجراء بعض التفاعلات الكيميائية الحيوية المفيدة صناعيًّا.

في النهاية: الانفجار

الجلوكوز وشمع الإضاءة (مادة هيدروكربونية) كلاهما عبارة عن «طاقة كامنة مجسدة»؛ ويؤدي تكسير روابطهما بالأكسجين إلى إطلاق الطاقة في صورة حرارية (ما لم يتم تحويلها إلى صور أخرى). ولكن يبحث بعض الكيميائيين عن جزيئات تعبئ طاقةً أكبر وأقوى، فما مقدار الطاقة التي يمكن اختزانها في جزيء ما؟

كان ألفريد نوبل يشغل نفسه بهذا السؤال في القرن التاسع عشر، والنتيجة المثيرة للمفارقة — أن ثروته التي جمعها من اختراعه للدِّيناميت هي التي منها يجري تمويل جائزته السنوية للسلام — معروفة جيدًا. لم يكن ما اخترعه نوبل هو اكتشاف جزيء غني بالطاقة، ولكن وسيلة لتعبئة مادة متفجرة موجودة بالفعل في صورة تكون أقل قابلية لأن تنفجر في وجه الإنسان.

إن أقدم مادة متفجرة هي البارود، والبارود خليط من الكبريت والنِّتر (نترات البوتاسيوم) والفحم النباتي، وقد اختُرع في الصين حوالي القرن الحادي عشر الميلادي. وقد انتشر في الغرب مع قليل من التغيير (ومع آثار سلبية فظيعة) حتى القرن

التاسع عشر، حين بدأ العلماء في كشف اللثام عن طرق لصنع انفجارات أشد؛ ففي عام ١٨٤٥ اكتشف الكيميائي السويسري كريستيان شونباين النيتروسليولوز؛ وهو مركَّب صُنِع بمعالجة ألياف القطن (السليولوز) بحمضَي النيتريك والكبريتيك. كان هذا أول بوليمر شبه تخليقي؛ أي إنه منتَج من كلٍّ من الطبيعةِ وفنِّ الكيمياء، وقد تم تطويره فيما بعد إلى «السليولويد» والبلاستيك الصلب والرايون، وهو أول «حرير اصطناعي». ولكن النيتروسليولوز كان أيضًا متفجرًا، وصار يعرف بقطن المدافع.

كان من الصعب السيطرة على الطبيعة العنيفة لقطن المدافع، وأدَّت المحاولات المبكرة لتصنيعه إلى وفيات عديدة. وفي عام ١٨٤٧ تَوصَّل الكيميائي الإيطالي أسكانيو سوبريرو إلى تخليق مادة خطرة بدرجة مشابهة سمِّيَت النيتروجلسرين. بدأ ألفريد نوبل دراسة هذا المركَّب في عام ١٨٥٩ محاولًا التوصل إلى وسيلة لجعله مستقرًّا إلى حين تفجيره عمدًا، وعكف على هذا الأمر بإصرار رغم حدوث انفجار في عام ١٨٦٤ أطاح بأخيه الأصغر وقتله. وقد وجد نوبل أن مزج النيتروجلسرين بمادة طينية تسمى كيسلجور أنتج متفجرًا شبيهًا بالمعجون يمكن تداوله بأمان، وأسماه «الدِّيناميت». وفي عام ١٨٧٥ استحدث نوبل الجلجنايت أو «الجيلاتين المتفجر»؛ وهو خليط شبيه بالهلام من النيتروجلسرين وقطن المدافع، وكان أقوى من أيٍّ من المادتين على حِدَة.

استُخدمت هذه المتفجرات بتوسع في عمليات التعدين والإنشاءات عامة؛ مما مكَّن نوبل من الحصول على ثروة طائلة. ولكن ما لم يكن منه مفر أنها سُخِّرت في الأغراض العسكرية أيضًا؛ إذ استَخدم الجيشان البريطاني والفرنسي في أواخر القرن التاسع عشر مادة «الكوردايت» المتفجرة، وهي شبيهة بالجيلاتين المتفجر، بينما استخدمت الكتائب الألمانية مادة ثلاثي نيتروتولوين (تي إن تي) التي لا تنفجر إلا إذا تم تفجيرها باستخدام مادة متفجرة ثانوية. ويخبرنا ألدوس هكسلي في روايته «عالم جديد شجاع» عن التركيب الكيميائي النادر لهذا الخليط المميت:

> $CH_3C_6H_2(NO_2)_3 + Hg(CNO)_2$ … حسنًا، يساوي ماذا؟ حفرةً هائلة في الأرض، أو كومة من ركام المباني، أو قطعًا من اللحم والعظم والمخاط، قدمًا لا يزال الحذاء لاصقًا بها، تتطاير في الهواء لتسقط بين أزهار الجيرانيوم …

كل هذه المركَّبات هي مواد عضوية تحتوي على مجموعة النتر (أو النيترو)؛ وهي ذَرَّة نيتروجين ترتبط بذرتَي أكسجين. وتَنتج الطبيعة المتفجرة لمركَّبات النيترو من حقيقة

أن ذرات النيتروجين تستعيد اتحادها لتكوِّن جزيئات من النيتروجين عند إشعال المواد. هذه الجزيئات لديها روابط مستقرة جدًّا، ولكن يُنتج تكونها قدرًا كبيرًا من الطاقة. في الوقت نفسه تحفز ذرات الأكسجين عملية الاحتراق؛ مما يسمح لها أن تَحدث بسرعة كبيرة. وقد تركزت عملية استحداث متفجرات أقوى أساسًا على مسألة التوصل إلى طرق لتعبئة المزيد من مجموعات النيترو في أحد المركَّبات العضوية. وتُعَد مادة آر دي إكس، أو السيكلونايت، المستخدمة في صناعة السلاح في يومنا هذا، نتاجًا لتحسين مادة التِّي إن تي في هذا الصدد. وأشد المتفجرات قوةً التي تُنتَج حاليًّا هي مركَّب غني بالنيتروجين يسمَّى إتش إم إكس، وهو اختصار لعبارة معناها «متفجر شديد الانصهار».

في مستهل عام ٢٠٠٠ تم ابتكار مركَّب نيترو معبأ بطاقة أكبر على يد كيميائيين في جامعة شيكاجو الأمريكية، وسمِّي أوكتانيتروكيوبان (أي ثُماني مكعب النيترو). وهو يتكون من مكعب من ثَماني ذرات من الكربون، ترتبط بكلٍّ منها مجموعة نيترو، وهذه الجزيئات لا تقتصر على أنها شديدة الغنى بالنيتروجين، بل إن الشكل المكعب هذا يعني أن الروابط بين ذرات الكربون شديدة التوتر، ويسهل كسرها وتفجيرها. من المفترض أن تكون الجزيئات المدمجة قادرة على أن تتراكم معًا في صورة بلورية معبأة بكثافة عالية، ولم تُنتج التجارب الأولية هذه الصورة العالية الكثافة، ولكن تتوقع الحسابات أنه إذا أمكن صنعها فستتميز بمحتوًى متفجر من الطاقة أكبر — جرامًا بجرام — من أي مادة متفجرة غير نووية معروفة للبشر.

ويبدو أن ما أوصى به ألفريد نوبل مِن مَنْح جائزة باسمه كان نابعًا من شعوره بالندم بسبب ما حدث من استخدام لاختراعه في تطبيقات وأغراض قاتلة ومدمرة. من الواضح أنْ ليس كل الكيميائيين يشعرون بهذه الطريقة حيال أبحاثهم المتعلقة بالأسلحة، ووجهة نظري الشخصية في هذا الصدد — التي تحتمل المناقشة — أن هذه الأبحاث وأمثالها هي صورة من سوء السلوك العلمي. ولكن الأهم من هذا أن إجراء الأبحاث على المواد الشديدة الانفجار يُظهر أن الأبحاث العلمية لا تنقسم بدقة تامة إلى عمل علمي لا أخلاقي «خالص» وعمل علمي أو تكنولوجي «تطبيقي» قذر وقابل للمساءلة والمحاسبة اجتماعيًّا؛ فقد كان صنع مادة الأوكتانيتروكيوبان عملًا فذًّا من الناحية التقنية، وقد تم تمويله من قِبل وزارة الدفاع الأمريكية.

إن المتفجرات تكشف اللثام عن الوجه المزدوج للعلوم الجزيئية، إذ هي جزء من متعة هذا العلم، فكل الكيميائيين الناشئين تقريبًا سعوا لعمل تلك التفاعلات الانفجارية

التقليدية التي يمكن أن يُجريها المرء في معمل المدرسة. إنني أعرف عالِمًا محترمًا واحدًا على الأقل، طُرد من مدرسته بسبب تدميره لها بالكامل تقريبًا (وهو الآن يُجري دراسات عن الآثار المجدبة التي تحدثها الشهب والنيازك العملاقة للأرض). إلا أن ما فصل بين هذه التجارب الانفجارية الوامضة وبين تدمير درسدن وهامبورج لم يكن سوى خطوة صغيرة، ويا لها من خطوة خطيرة!

هوامش

(١) إذا لم تكن تعرف ما أعنيه، فاقرأ رواية «الشرطي الثالث» واكتشف هذا بنفسك!

(٢) إذا شئت الدقة، هذا ينطبق على التغيير غير القابل للانعكاس، أما التغييرات التي يمكن عكسها فتحدث مع عدم حدوث تغير في الإنتروبيا. ولا أعني بكلمة «قابل للانعكاس» إرجاع شيءٍ ما مجددًا إلى حيث أخذتَه من قبل؛ فحرارة الجسد، وجميع حركات الهواء، وكل حركات الدَّلْك الاحتكاكية تعني أن الْتقاط جسمٍ ما هو أمر غير قابل للانعكاس.

(٣) ليس ثلاثي فوسفات الأدينوسين هو المصدر الوحيد للطاقة لتشغيل آلات الخلية، ولكنه الأكثر شيوعًا. تَستخدم بعض التفاعلات الإنزيمية جزيئات مماثلة أخرى غنية بالطاقة، لا سيما ثلاثي فوسفات الجوانوسين.

(٤) سيلاحظ علماء الكيمياء الحيوية المتشددون أن تفسير إطلاق عملية التحليل المائي هذا للطاقة هو تفسيرٌ مبسطٌ.

(٥) يحدث في الجسم الكثير من العمليات لدرجة تجعل من النادر أن يستطيع المرء الإدلاء بمقولة عامة شاملة، وهذا ليس استثناءً من القاعدة؛ إذ إن بعض الأنسجة تحوِّل كميات كبيرة من الجلوكوز إلى اللاكتات حتى في الأحوال الهوائية.

(٦) تستطيع الحيوانات التي تتصف بمعدلات أيضية أعلى أن تتحمل الإجهاد لفترات أطول لأن أجسامها تصنع ثلاثي فوسفات الأدينوسين بسرعة أكبر؛ فيستطيع طائر الطنان أن يرفرف بجناحيه بسرعة شديدة لفترات طويلة، وكأنه عدَّاء للمسافات القصيرة لا يتعب.

الفصل الخامس

المحركات الدقيقة المفيدة: المحركات الجزيئية

ليس من المعهود أن تتسبب الخُطَب التي تُلقى بعد تناول طعام العشاء في الأحوال العادية في إطلاق الثورات، ولكن ريتشارد فاينمان — الذي طُلب إليه إلقاء خطاب أمام قسم الساحل الغربي بالجمعية الفيزيائية في عام ١٩٥٩ — لم يكن فيزيائيًّا عاديًّا، بل كان واحدًا من أكثر العقول العلمية إبداعًا في القرن العشرين في فترةٍ ما بعد الحرب، ولا يزال الكثيرون يذكرونه في العالم على نطاق واسع كعازف لآلة البونجو، وكمدبر للمقالب، ومحطم للخزائن الحديدية، وأحد أكثر الشخصيات استعصاءً على الفهم في العلوم الحديثة.

كان خطاب فاينمان في عام ١٩٥٩ خفيفًا في مظهره، ولكنه جاد في فحواه، وقد أعطاه عنوانًا هو «هناك متسع كبير في القاع»، وكان يتحدث عن الهندسة في نطاقات الحجم الشديدة الدقة التي لا يمكن رؤيتها. قال فاينمان: «ما أردت أن أتكلم بشأنه هو مشكلة التعامل مع أشياء صغيرة والسيطرة عليها.» واستمر فاينمان قائلًا إنه لم يقصد بكلمة «صغيرة» أنها «محركات كهربية في حجم ظفر أصبعك الصغرى»، بل يقصد أنها في مثل صغر الذرات.

استطرد فاينمان قائلًا: «تخيلْ أن باستطاعتك ترتيب الذرات واحدة واحدة، كما تشاء تمامًا.» وهذا، في نظره، ما يحاول الكيميائي أن يفعله أساسًا:

> إن الكيميائي يفعل شيئًا غامضًا حين يريد أن يصنع جزيئًا. فهو يرى أنه حصل على ذلك الخاتم السحري أو تلك الحلقة الكيميائية؛ ولذا فإنه يخلط

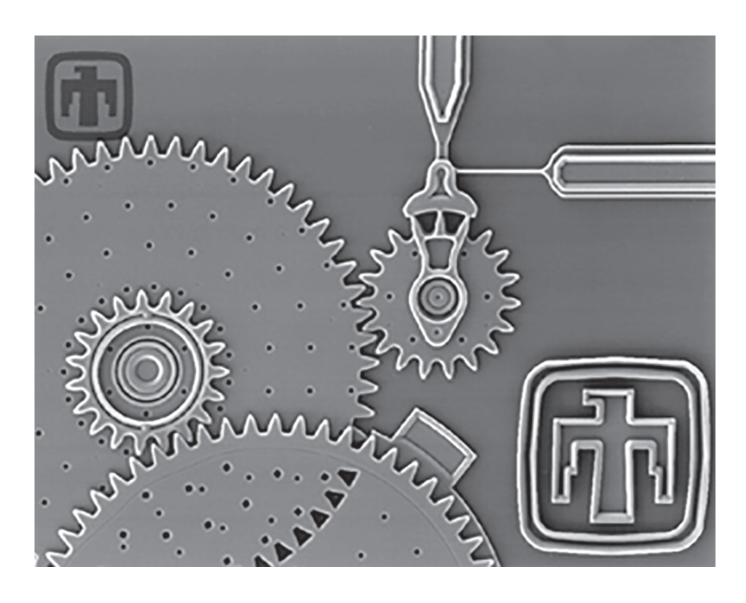
هذا بذاك، ويرجُّ المزيج، ويعدِّل هنا وهناك، وفي نهاية هذه العملية الصعبة عادة ما ينجح في تركيب ما أراد.

ويمكنك أن ترى أن وجهة نظر عالِم الفيزياء فيما يفعله الكيميائيون ليست أكثر حنكة بكثير من وجهة نظر رجل الشارع، ولكن توصيف فاينمان لا يختلف كثيرًا عن ذلك الذي طرحه بريمو ليفي وهو يشرح كيف يبني الكيميائيون الجزيئات كما يبني المهندسون الجُسور (انظر الفصل الأول). ومع ذلك، فإن الكيميائي تَعوَّد تقليديًّا على اعتبار الجزيء مادة؛ شيئًا يمكن بَلْوَرَتُه ووَضْعُه في زجاجة، أما الفيزيائي من الناحية الأخرى، فإنه يرى الجزيء مثل شيء إنشائي، كأحد مكونات محرك آلي.

كان فاينمان بالأساس يتساءل إن كان بمقدور الفيزيائيين أن يفعلوا ما يفعله الكيميائيون، ولكن مع ارتداء قبعة مهندس. فهل يمكننا أن نبني جزيئًا عن طريق دفع الذرات إلى أماكنها واحدة واحدة؟ لم يكن أحد في عام ١٩٥٩ يفكر في هذا الأمر سوى شخص ذي خيال سحري مثل فاينمان.

إلا أنه لم يكن يصدر تخمينات غير مبنية على أساس؛ فحتى في تلك الآونة، كان واضحًا أن التكنولوجيا آخذة في الصغر أكثر وأكثر. أدى اختراع الترانزستور في أربعينيات القرن العشرين إلى تضاؤل مقياس الإلكترونيات؛ فالصناديق الكبيرة المليئة بالأنابيب المفرغة حلت محلها أجهزة مدمجة تحتوي على دوائر «حالة مصمتة» صُنعت من وحدات الترانزستور السليكونية. كان جهاز الراديو الترانزستور المحمول على كل شاطئ أمريكي، وصار المهندسون ماهرين بشكل متزايد في صنع مكونات آلية دقيقة، ربما بالقدر الذي يتجاوز كثيرًا حدود إدراك فاينمان. ولأنه كان يأمل أن يقدم حافزًا صغيرًا يدفع به تكنولوجيا التصغير للأمام، فقد عرض جائزتين بألف دولار مَوَّلهما بنفسه: واحدة لصنع محرك إلكتروني لا يزيد قياسه عن ١ / ٦٤ من البوصة من جميع جوانبه، والأخرى لِنَقْل المعلومات التي على صفحة كتاب عادي وكتابتها على مساحة مقياسها ١ / ٢٥٠٠٠ من الصفحة الأصلية. لعل فاينمان كان يتوقع أن تبقى أمواله في أمان على مدى سنوات قادمة، ولم يكن يتخيل أن يأتي شخصٌ ما — وكان مهندسًا يدعى ويليام ماكليلان — ليجيب أول هذين التحديين في غضون أشهر قليلة.

واليوم يمكننا أن نتقدم أكثر؛ فقد تم نحت أجزاء ميكانيكية ومحركات عرضها عُشر ملِّيمتر من رقاقات السليكون باستخدام الحفر بالمحاليل الحمضية أو بحزم الأشعة الإلكترونية (شكل ٥-١). إلا أنَّ نَحْت أجزاء من ألواح المواد يمكن أن نعتبره شيئًا جيدًا



شكل ٥-١: محرك دقيق (مجهري) نُحت من رقاقة سليكون.

جدًّا إلى أن نصل إلى مقياس حوالي عُشر الميكرومتر؛ إذن تستطيع بالكاد الطُّرُقُ الحالية لصنع الدوائر المتكاملة من السليكون صُنْعَ أسلاك بهذا السُّمك. وهي تقف عاجزة عن التقدم أكثر؛ إذ يصير الأمر مثل محاولة شطر شعرة بشرية بسكين الخبز.

وبدأ الباحثون يتساءلون إن كان هذا الأسلوب «من أعلى لأسفل» عمليًّا بتلك المقاييس؛ فالمكونات التي بهذا الصغر تكون أقرب في الحجم للجزيئات (الجزيئات المتوسطة الحجم أصغر بمائة مرة) منها لرقاقات السليكون التي يمكنك أن تمسكها وتراها في يدك، فهل يجب إذن أن نبدأ في صنع أشياء من أسفل لأعلى؛ أي انطلاقًا من الجزيئات المفردة؟

اعترف بريمو ليفي في روايته «المفتاح الإنجليزي» أن الكيميائيين يحلمون باستحداث صندوق الأدوات من أجل البناء على المقياس الجزيئي، فقال:

> ليست لدينا تلك الملاقط الصغيرة التي كثيرًا ما نحلم بها ليلًا كما يحلم الظمآن بينابيع الماء، والتي تتيح لنا أن نلتقط قطعة دقيقة ونمسك بها بإحكام وأمان

ونلصقها في الاتجاه السليم على القطعة الأخرى التي ركَّبناها بالفعل. فلو كانت لدينا تلك الملاقط (ولعل هذا يتحقق يومًا ما)، فربما نأمل أن نبدع بعض الأشياء المحببة التي لم يخلقها أحد إلا القوي القدير، لا أقول ضفدعة أو ذبابة، ولكن على الأقل ميكروبًا أو جرثومة فطرية.

وجد فاينمان كذلك إلهامًا في الأجهزة الجزيئية والصنائع البيولوجية «التي تُستخدم فيها القوى الكيميائية بطريقة رتيبة تكرارية لإنتاج جميع أنماط التأثيرات الغريبة (ومن بينها المؤلف نفسه).» أدرك فاينمان أنه توجد بالفعل آلات جزيئية في عالم البيولوجيا، وفي عام ١٩٥٩، ما إن وصل هذا الكلام إلى آذان علماء البيولوجيا حتى رفضوه باعتباره مجرد محاولة من عالِم فيزيائي أحمق ليفرض وجهة نظره الشخصية في حقل من الواضح أنه لا يعرف عنه شيئًا. ولكن اليوم نجد علماء البيولوجيا يَسعدون تمامًا بالحديث عن البروتينات بوصفها آلات جزيئية.

يلقي هذا الفصل نظرة على بعضٍ مِن أهم تلك الأشياء، وهي الجزيئات البروتينية التي تخلق الحركة؛ وهي محركات جزيئية غالبًا ما تسمى البروتينات الحركية. إن المحرك الصغير الذي فاز بجائزة فاينمان يعتبر عملاقًا أخرق عند مقارنته بها، وكأننا نقارن بين ديناصور هائل يمشي بتثاقل وبرغوث خفيف الحركة. إن الأهمية البيولوجية للبروتينات الحركية كبيرة لدرجة لا يمكن حصرها؛ فلولاها لما استطعنا تحريك عضلة واحدة، ولا استطاعت الطيور أن تُحلِّق في السماء، ولا استطاعت الأسماك أن تجوب البحار، ولا استطاعت حتى البكتيريا أن تتحرك، وأسوأ من هذا أن الخلايا لن يمكنها الانقسام؛ ومن ثم فلن يكون ثمة تكاثُرٌ؛ فمن دون الجزيئات التي تدفع الحركة لن تكون هناك حياة.

إلا أنه في نظر ميكانيكا العالَم الجزيئي تقول البروتينات الحركية شيئًا آخر؛ إذ تظهر أن الهندسة على المقياس الجزيئي أمر ممكن، فبإمكاننا أن نخفض مقياس الأفكار المألوفة لدينا من العالم اليومي العادي إلى عالم الجزيئات. وليست البروتينات الحركية فريدة في هذا الشأن، ولكنها تُظهر الفكرة بوضوح نادر. سوف أشرح كيف يمكننا أن نحقق أهدافًا مماثلة ببساطة عن طريق صنع محركاتنا الجزيئية حسب الطلب، وهذا يقودنا إلى الحلبة التي اتجه نحوها حديث ريتشارد فاينمان، إلى أول مَعْلَم واضح على الطريق: تكنولوجيا النانو؛ أي التكنولوجيا على مقياس الأشياء المتناهية الدقة التي تقاس بالنانومتر، وهي مسافات يمكن أن نقيسها بالجزيئات.

زحف الداينين ومشي الكينيزين

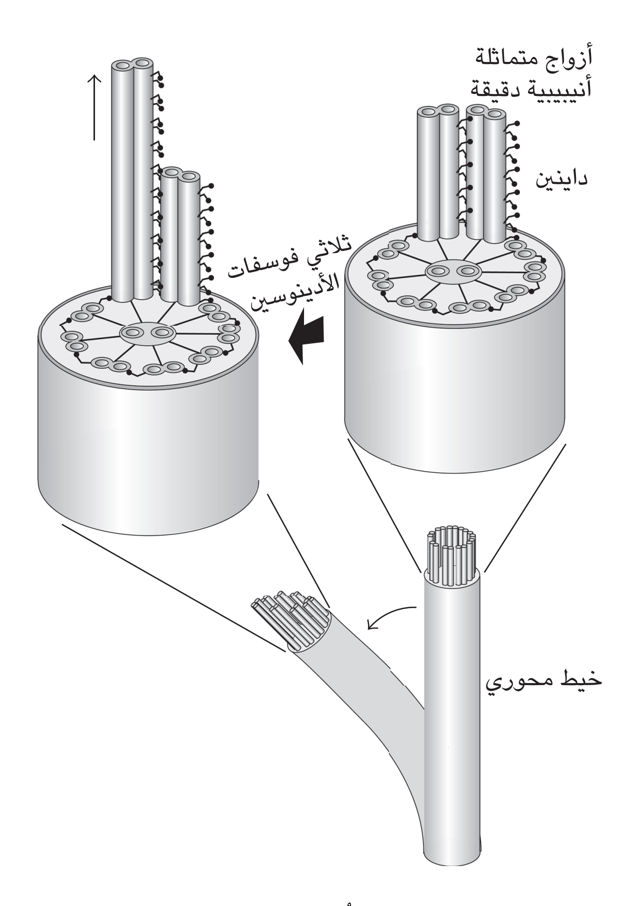
إنَّ شَكْل الجزيء ليس ثابتًا إطلاقًا؛ فهو يتذبذب دائمًا ويهز أجزاءه السائبة. وتُعَد الحركة الميكانيكية خاصية منتشرة في العالم الجزيئي.

ولكن بصفة عامة، إما أن تكون الحركات الجزيئية عشوائية، مثل الحركة الملتوية المتعرجة لسلسلة بوليمرت تطفو في محلول؛ وإما أن تكون هادئة قريبة من الصفر، مثل ذبذبات تتحرك جيئة وذهابًا لرابطة كيميائية. ما نحن بحاجة إليه من محرك أصلي — على النقيض من هذا — هو الحركة مع نزعة اتجاهية؛ وهو ما يمكن أن نَصِفَه بالحركة الهادفة.

من المعروف أن المحرك يستهلك وقودًا، ويمكنك اعتبار هذا ثمنًا لا مفر منه للحركة المنضبطة، وهي ضريبة يفرضها القانون الثاني للدِّيناميكا الحرارية. أما الحركة الجزيئية العشوائية من الناحية الأخرى فيمكن الحصول عليها مجانًا، من الاهتزاز الجزيئي المشوش الذي يسمى الحرارة.

إن أجسامنا تنجز أنماطًا كثيرة من حركات النقل الموجهة؛ على سبيل المثال، تسبب حركة الأهداب الخلوية — وهي زوائد شعرية الشكل تبطِّن المسالك التنفسية للرئتين والقصبة الهوائية — تحرُّكَ طبقة من المخاط من بطانة الرئتين لأعلى تجاه الحلق، حيث تتراكم في صورة بلغم، وهذا المخاط يلتقط القاذورات؛ ومن ثم فإن التخلص منه يُبقي الرئتين نظيفتين. وكي يتحرك هذا المخاط لأعلى لا يمكن أن تكتفي الأهداب بمجرد التقلب هنا وهناك، ولكن يجب أن تنفذ تتابعًا متناسقًا من الحركات، مثل ذراعي السباح. فهي تصنع «ضربة قوية» تشبه السوط تتبعها «ضربة استرجاع» زاحفة بطيئة. بعض الكائنات الوحيدة الخلية التي تسمى الطلائعيات تَستخدم الأهداب بالفعل على أسطحها الخلوية لكي تسبح في الماء.

المحرك الجزيئي الذي يَدفع هذه الحركات هو بروتين يسمى الداينين، ويحتوي كل هدب على أنيبيبات دقيقة (انظر الفصل الثالث) مرتَّبة حول محيط أنبوبة تسمى الخيط المحوري. ترتبط الأنيبيبات معًا في أزواج تسمى الأزواج المتماثلة، مثل ماسورة بندقية مزدوجة. ويوجد تسعة من أزواج الأنيبيبات لكل خيط محوري، وهي مترابطة معًا بجزيئات الداينين، وتَبرز عند مسافات منتظمة مثل أرجل الدودة الألفية (شكل ٥-٢).



شكل ٥-٢: انثناء الأهداب تُحدثه محركات الداينين الجزيئية.

ولكي يتحرك الهدب، «تمشي» الأنيبيبات الدقيقة بعضها فوق بعض؛ فكل جزيء داينين لديه «رِجل» تنثني بواسطة تفاعل يستهلك ثلاثي فوسفات الأدينوسين. الداينين أساسًا هو إنزيم يفكِّك ثلاثي فوسفات الأدينوسين، ويغير الشكل نتيجة لهذا. أيضًا يحتاج هذا التفاعل إلى أيونات الكالسيوم لإطلاقه، ويتم التحكم في الحركة بفعل إشارات عصبية تطلق عملية حقن الكالسيوم في الهدب.

ونظرًا لأن جزيئات الداينين تبرز جميعًا في الاتجاه نفسه، فإنها تجذب أحد الزوجين المتماثلَين الأنيبيبيَّين الدقيقَين فوق الآخر حين تنثني. وعندما تريد الجزيئات أن تستقيم مجددًا، تعود الأنيبيبات الدقيقة لمواضعها الأصلية. ولكي تتولد الحركة للأمام، يفصل كل جزيء من الداينين نفسه من الأنيبيبة الدقيقة الثانية قبل أن تتم الاستقامة، ثم يعيد ارتباطه لإنجاز «ضربة القوة» التالية. ويستطيع الداينين أن يفكِّك ثلاثي فوسفات الأدينوسين، وأن يتحول إلى الحالة المنثنية فقط حين ترتبط «قدمه» بأنيبيبة دقيقة أخرى.

وهكذا فإن حركة زحف الأزواج المتماثلة بعضها فوق بعض تشبه عمل السقاطة؛ إذ تولِّد دورة ارتباط الداينين وانثنائه وانفصاله ثم استقامته الحركةَ في اتجاه واحد. ولكن نظرًا لأن نهايات الأنيبيبات الدقيقة تكون مثبتة بقاعدة الخيط المحوري، فإن هذا الانزلاق للواحد فوق الآخر يسبب انثناء الهدب. ومع التناسق السليم للحركات الانزلاقية، فإن الهدب ينثني أولًا بهذه الطريقة ثم بتلك بعد ذلك، ويبدو أن التناسق يأتي من اثنتين من الأنيبيبات الدقيقة المتجهة لأسفل في مركز الخيط المحوري، وإن لم يكن من المفهوم حتى الآن كيفية تحقيق ذلك.

يلعب الداينين دورًا عامًّا أوسع في عالم الخلية؛ إذ هو أحد المحركات التي تحرك الأشياء هنا وهناك. فخلايانا تشدها من الداخل شبكة من الأنيبيبات الدقيقة كقضبان السكك الحديدية، ومن وقت لآخر تحتاج الخلية لأن تعيد ترتيب أجزائها، وهي التراكيب الغشائية المسماة «العضيئات»، وعند التصاق الداينين بالجدار الغشائي يمكنه أن يجذب العضيء على طول المسارات.

هذه المسارات أحادية الاتجاه، فنهايات الأنيبيبات الدقيقة ليست متكافئة، ومن نهاية واحدة منها فقط — تسمى النهاية الموجبة — يمكن إضافة جزيئات التيوبيولين أو حذفها (انظر الفصل الثالث). دائمًا ما يتحرك الداينين تجاه الطرف الآخر — النهاية السالبة للأنيبيبة الدقيقة التي تقع تجاه مركز الخلية — وحين تنقسم الخلية إلى خليتين يجذب الداينين الطقمين المزدوجين من الكروموسومات على طول الأنيبيبات الدقيقة لمغزل الانقسام الفتيلي (انظر الفصل الثالث) حاملًا إياهما تجاه مركزي الخلايا الوليدة الناشئة المقابلة.

ولكي يتم النقل على طول الأنيبيبات الدقيقة في الاتجاه الآخر (الموجب) يُستخدم نوع مختلف من البروتينات الحركية (أو المحركات) يسمى الكينيزين. لعل الكينيزين

هو أكثر الجزيئات المسببة للحركة شبهًا بالبشر؛ إذ إن لديه ساقين وله «مشية» متهادية، مقارنة بالداينين الذي يزحف بساق واحدة كأنه دودة صغيرة. والكينيزين أيضًا يشغِّله تفاعل يستهلك ثلاثي فوسفات الأدينوسين، ويغيِّر شكل البروتين.

يعتبر الكينيزين رجل البريد للخلية؛ إذ يوصِّل الطرود بين كل عُضيئة وأخرى؛ مثلًا، يجب إرسال البروتينات من نقطة تصنيعها (الشبكة البلازمية الداخلية) إلى أجزاء الخلية التي تحتاج إليها، فيتم تعبئتها داخل كرات غشائية صغيرة تسمى حويصلات النقل، ويحمل الكينيزين إحدى حويصلات النقل على طول الشبكة الأنيبيبية الدقيقة، وصولًا إلى العنوان الصحيح.

القوة العضلية

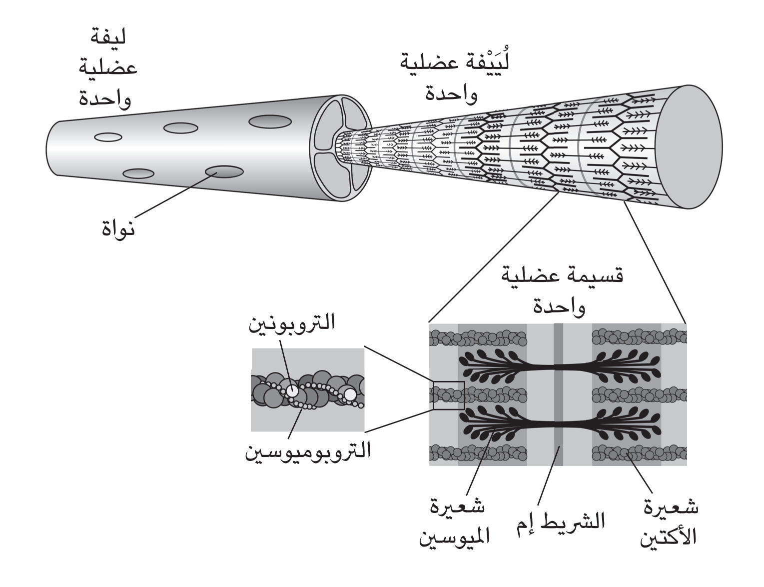
الانقباضات والارتخاءات العضلية هي التي تمنحنا القدرة على المشي. والعضلات الهيكلية تحرِّكنا في اتجاهات متضادة، ويمكنها عن طريق الانقباض والانبساط أن تتحكم في كل شيء بدءًا من الحركات الرقيقة لأصابع عازف البيانو، وحتى حركة الفخذين القوية لأحد الرياضيين.

العضلة الهيكلية واحدة من المواد الجزيئية الهرمية الطبيعية (انظر الفصل الثالث)؛ فهي تركيبة ليفية من حزم داخل حزم داخل حزم. تكون الخلايا العضلية المنفردة شديدةَ الاستطالة وتحوي كابلات كثيرة الخيوط، نُسجت من خيوط تسمى اللُّيَيْفيات العضلية. وداخل البنية التحتية الجزيئية المعقدة لهذه الخيوط تسكن أسرار الانقباض العضلي.

إذا نظرنا إلى اللُّيَيْفة العضلية من خلال المجهر فسنجد أنها مميزة بعلامات، هي أشرطة فاتحة وداكنة متفاوتة العرض، وهذه الأشرطة تكسب العضلة الهيكلية مظهرًا مخططًا عند النظر إليها بقوة التكبير العظمى؛ ولهذا السبب تعرف أيضًا بالعضلة المخططة. يتكرر تتابُع الأشرطة دوريًّا على طول خيط اللُّيَيْفة العضلية، وكل وحدة تكرارية منها تسمى «قسيمة عضلية»، وتُعطى الأشرطة المختلفة داخل كل قسيمة عضلية اسمًا بسيطًا — مثل الشريط إيه، والمنطقة إتش، وهكذا — يَشِي بأنه لم يكن لدى أيِّ شخص أدنى فكرة عن دلالتها حين رُصدت لأول مرة.

حين لاحظ في خمسينيات القرن العشرين كلٌّ من أندرو هكسلي وهيو هكسلي ومساعدوهما أن هذه الأشرطة تغيِّر عرضها عند انقباض العضلة، افترضوا نظرية

الشعيرة المنزلقة للحركة العضلية، وكانت فكرتهم أن اللُّيَيْفة العضلية تحتوي على تراكيب شبيهة بفرشاة الأسنان يواجه بعضها بعضًا، وهي مدفوعة فيما بينها بحيث تتداخل شعراتها الصلبة فيما بينها وتحتوي كل قطعة قسيمة على طقم مزدوج من هذه الأزواج من الفرش الموضوعة ظهرًا لظهر. تقابِل الأشرطة الداكنة المناطقَ التي تتشابك عندها الشعرات وتتداخل (بما يخلق كثافة عالية من الجزيئات) بينما في الأشرطة الفاتحة (أو الباهتة) لا يوجد سوى طقم واحد من الشعرات (شكل ٥-٣). وقد افترض الأخوان هكسلي أن اللُّيَيْفة العضلية تَقصُر — ومن ثم تنقبض العضلة — عن طريق حدوث تداخل بيني أعمق لشعرات القسيمة العضلية.



شكل ٥-٣: الشعيرات المتداخلة في العضلة تمكِّنها من الانقباض.

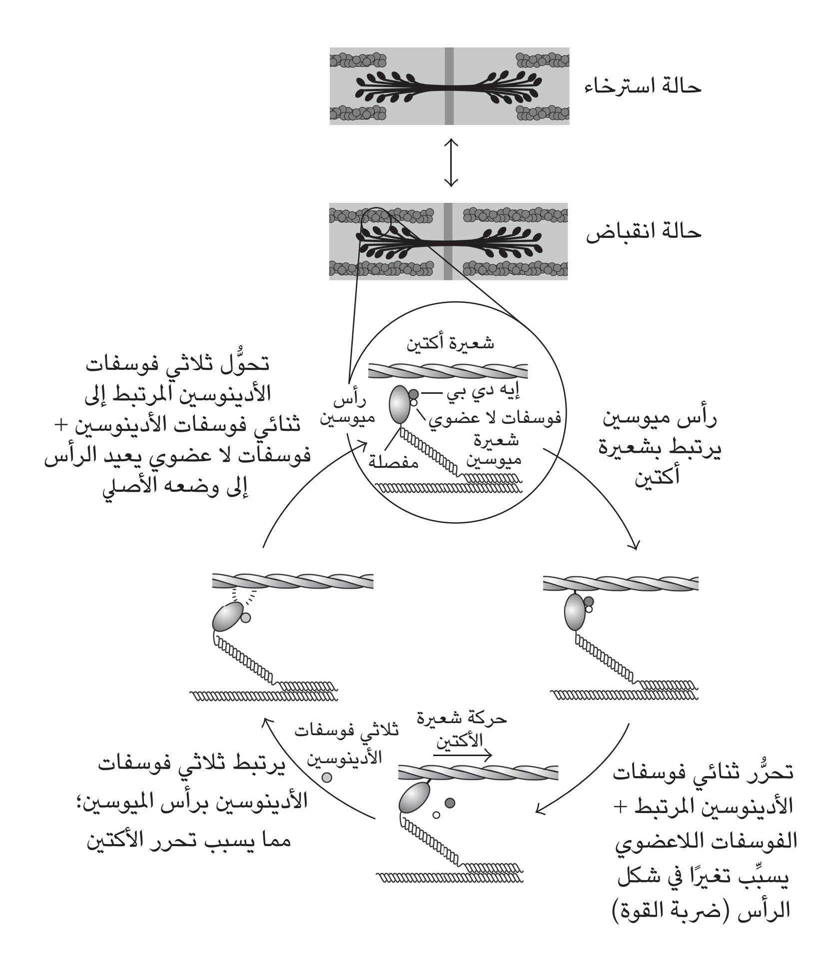
هذه الحركة للشعيرات بعضها فوق بعض يدفعها البروتين الحركي المسمى «الميوسين»، وهو بروتين رفيع طويل تلتوي في داخله سلسلتان لولبيتان إحداهما حول الأخرى. وعند كلتا النهايتين تنتهي السلسلتان في رأسٍ كمثريِّ الشكل، وتتجمع

جزيئات الميوسين في حزم تسمى شعيرات الميوسين، وتتشابك كل نهاية من الشعيرة مع رءوس الميوسين مثل مخروط يبرز من حزمة من الذرة.

من بين حزم الميوسين تبرز شعيرات من بروتين يسمى الأكتين، وهذا البروتين كروي الشكل، ولكن الكريات ترتبط معًا لتشكل سلسلة مثل خرزات العقد، وتلتف سلسلتان من خرزات الأكتين — في شعيرة الأكتين — إحداهما حول الأخرى في شكل لولبي مزدوج. ثم يُرصَّع العقد تحليًا بخيوط من البروتين المسمى تروبوميوسين، والتي تلتف على طول شعيرة الأكتين، ويستقر عند مسافات منتظمة بروتين كروي يسمى التروبونين (انظر شكل ٥-٣).

تنقبض العضلة حين تلصق رءوس الميوسين أنفسها بشعيرات الأكتين، ثم تجذب أنفسها على طولها، وهو نفس المبدأ مثل الذي يتحرك بمقتضاه الداينين والكينيزين على طول الأنيبيبات الدقيقة؛ إذ يتم توليد الحركة بحدوث تغيير في شكل البروتين الحركي الملتصق تدفعه عملية تفكك ثلاثي فوسفات الأدينوسين إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين. يتأرجح رأس الميوسين على مفصلة تربطه ببقية الجزيء، وهو يلتوي ويفصل نفسه من الأكتين، ويفك الالتواء ويعيد الالتصاق؛ ومن ثم يعمل عمل السقاطة على طول شعيرة الأكتين في سلسلة من ضربات القوة (شكل ٥-٤).

تخضع العملية برمتها للتحكم الإرادي، وتبدأ حين تأتي نبضة عصبية من المخ، وتخبر العضلة بأن تنقبض أو ترتخي. تُعَد بروتينات التروبوميوسين والتروبونين التي على شعيرة الأكتين بمنزلة مفاتيح تشغيل. وترتبط العضلات «سلكيًّا» بالمخ عن طريق خلايا عصبية تسمى العصبونات الحركية، والأعصاب الواصلة بينهما هي أشبه بأسلاك «ملتحمة» بطريقة كيميائية حيوية بالسطح الخارجي لِلِّيفة العضلية. وعند وصول إشارة كهربائية إلى نهاية العصبون الحركي فإنها تحث على انطلاق أيونات من الكالسيوم من شبكة من الأنابيب — تسمى الشبكة البلازمية اللحمية — التي تمتد خلال الفراغات التي بين اللُّيَيْفات العضلية داخل الليفة العضلية. يتم اقتناص أيونات الكالسيوم هذه من جانب جزيئات التروبونين التي على شعيرة الأكتين؛ مما يحث على تغيير شكلها. وهذا بدوره يسبب جذب خيوط التروبوميوسين، التي تلوي عقد الأكتين اللولبي المزدوج وتدير «خرزات» الأكتين. وهذا الدوران هو الذي يكشف المواقع على الأكتين التي يرتبط بها الميوسين. وهكذا يحتوي التركيب بأكمله على آلية نقل جزيئية رائعة لتحويل الانقباض بين وضعَي التشغيل والإيقاف.



شكل ٥-٤: يَنتج الانقباض العضلي عن حركة محركات الميوسين الجزيئية على طول شعيرات بروتين الأكتين.

الملقَط الجزيئي

في الماضي، تعيَّن على العلماء أن يستنبطوا كل ما عرفوه عن الجزيئات من قياسات أُجريت على عدة مليارات منها دفعة واحدة. لكن هذا الإجراء يمكن ألا يكون صحيحًا؛

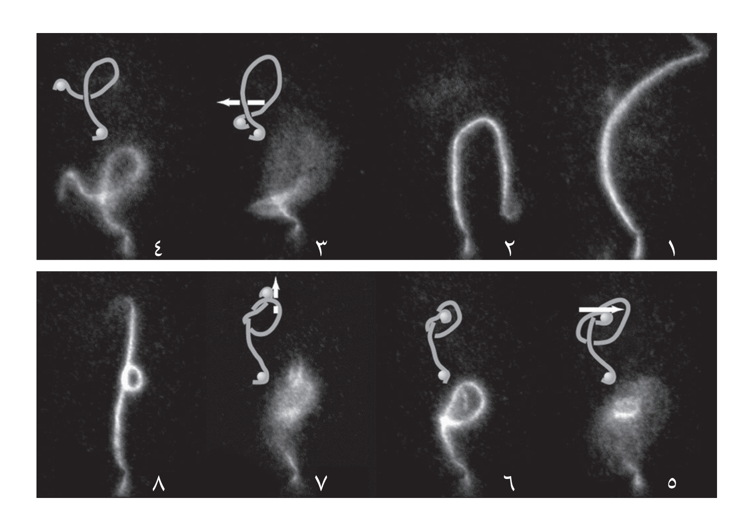
لأننا لا يمكن دائمًا أن نكون موقنين بكيفية ارتباط هذه القياسات بخصائص الجزيئات المفردة، تمامًا كما أن الضوضاء الصادرة من ملعب لكرة القدم أو قاعة مسرح لا تنمُّ عن أي شيء من الأحاديث المفردة التي تجري بين الناس هناك. إلا أن ما حدث من تقدُّم في التقنيات التجريبية التي مكَّنت من إجراء دراسات على الجزيئات المفردة — عن شكلها، وكيفية تفاعلها فيما بينها، وكيفية تحركها — قد فتح الباب خلال العقدين الماضيين على عالم جديد تمامًا من الدراسات الجزيئية. لقد بدأنا توًّا في معرفة شيء عن الجزيئات نفسها.

من الاختراعات المهمة في هذا العصر اختراع ملقط لمعالجة الجزيئات وتداولها؛ وهي نفس الأداة التي تمنَّاها بريمو ليفي. وأهم شيء عن هذا الملقط ليس أنه شديد الصغر، ولكن أنه غير ملموس حرفيًّا؛ فهو مصنوع من الضوء، ويسمى الملقط البصري. وهو يحتجز الأشياء في حزمة ضوء قوية جدًّا، ويسمح للباحثين بأن يجيبوا عن مختلف الأسئلة التي يمكن أن يوجهها المرء عن المحركات الآلية، مثل: ما مدى كفاءتها؟ ما مقدار الحمل الذي يمكن أن تتحمله؟ ما سرعة تحركها؟

إن التفاعل بين الضوء والإلكترونات في الجزيئات يمكن أن يخلق قوة، وهي نوع من «الضغط الضوئي» على جسمٍ ما. فإذا كان هذا الجسم صغيرًا بدرجة كافية، وكان الضوء قويًّا بدرجة كافية، فإن هذا الجسم يمكن تحريكه باستخدام تلك القوة. وفي حالة الملقط البصري تُحْدث نقطة التقاطع بين حزمتين أو أكثر من حزم أشعة الليزر بقعةً من الضوء الشديد السطوع، ويتعرض الجسم الصغير الواقع داخل هذه المساحة الساطعة لضغط ضوئي من جميع جوانبه؛ مما يمنعه من التحرك في أي اتجاه، فيتم الإمساك به في مصيدة بصرية بين «فكَّي» ملقط أشعة الليزر. فإذا تحركت حزم الأشعة، فإن الجسم يُجذَب معها.

يمكن قياس القوة المتولدة عن بروتين حركي واحد (محرك جزيئي) عن طريق إما شد ذلك المحرك وإما شد الجسم الذي يحركه (ولْيكنْ شعيرة أكتين مثلًا) إلى خرزة لدنة مجهرية مثبتة بين «فكَّي» الملقط الضوئي. وتعمل الحركة المتولدة عن هذا المحرك على شد الخرزة بعيدًا عن مركز المصيدة بمقدار يتناسب طرديًّا مع القوة المتولدة.

وباستخدام الخرزة كمقبض، يمكن استخدام الملقط البصري لإنجاز أشياء غير عادية باستخدام الجزيئات؛ إذ قام كازوهيكو كينوسيتا في جامعة كيو باليابان ومساعدوه بإلصاق خرزتين بكلٍّ من نهايتَي شعيرة أكتينية، ثم جذبوا إحدى النهايتين هنا وهناك



شكل ٥-٥: استُخدم الملقط البصري لربط هذه العقدة في خيط من الأكتين. عملت الخرزتان المجهريتان الملتصقتان بكلتا نهايتَي الخيط «كمقبضين»، وقد تم إظهار الأكتين للعيان تحت المجهر بتسليط الضوء الساطع عليه لجعله متألقًا.

إلى أن تم لَضْمُهما على شكل أنشوطة؛ مما أنتج عقدة جزيئية (شكل ٥-٥). وقد أحكموا شد هذه العقدة حتى انكسرت. ولأن شعيرة الأكتين صلبة بعض الشيء مثل فرع شجيرة؛ فقد ضعفت حين انحنت بشدة، وكانت القوة المتطلَّبة لكسر الشعيرة المعقودة أقل بكثير من تلك المطلوبة لتمزيق شعيرة غير معقودة.

ليس الملقط البصري هو الأداة الوحيدة للإمساك بالجزيئات كلٍّ على حِدَة، بل توجد أجهزة تسمى مجاهر مسبار المسح التصويري، اختُرعت في ثمانينيات القرن العشرين (واستخدمت لالتقاط الصور المبينة في (شكل ١-٥))، وأثبتت فائدتها الهائلة ليس فقط في ملاحظة عالم الجزيئات ولكن معالجته كذلك. ومن بين تلك الأدوات ما أُطلق عليه اسم مجهر القوة الذرية، الذي يتيح للباحثين أن يسبروا غور الخصائص الآلية للجزيئات — مدى صلابتها أو قابليتها للمطِّ على سبيل المثال — ويمكن حرفيًّا الإمساك بجزيءٍ ما من إحدى نهايتيه باستخدام هذا المجهر وجذبه كأنه قطعة من المطاط.

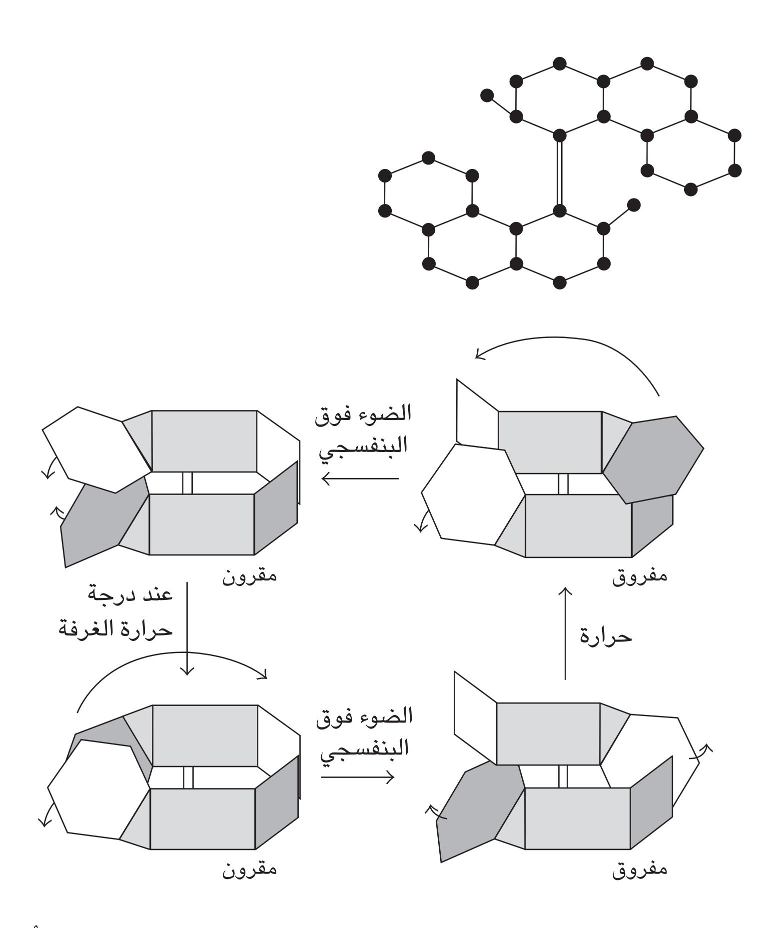
تصميم المحركات

من أبرز الشخصيات المبشِّرة في حقل تكنولوجيا النانو كيه إريك دريكسلر، وهو عالِم مستقل يرأس «معهد البصيرة» في كاليفورنيا. وقد لعبت رؤية دريكسلر — التي تدور حول آلات تجميع روبوتية جزيئية يمكنها أن تركِّب أي آلة جزيئية (بما فيها آلات التجميع الروبوتية نفسها) ذَرة بِذَرَّة — دورًا مؤثرًا في إدراك عامة الناس للفوائد المرجوة من تكنولوجيا النانو (ولأخطارها كذلك). لكن العلماء أقل ترحيبًا بهذا الأمر؛ إذ يُظهر بعضهم القلق من فشل فكرة دريكسلر عن آلات تجميع الذرات في وضع حساب للحرارة التي لا مفر من انطلاقها عند تجميع الذرات. فضلًا عن هذا، فإن أشكال الجزيئات كثيرة ومتفاوتة، ولكنها ليست عشوائية، فلا ضمان لأن يكون مخطط معين بالمقياس الجزيئي لمكون مختص بتكنولوجيا النانو متفقًا مع نظام مستقر يمكن تحقيقه من الذرات.

وقد بدأ دريكسلر تحديد إطار لأفكاره في عام ١٩٨٦ في كتابه «محركات الإبداع»؛ حيث كان أبطال الكتاب (وخصومهم في بعض الأحيان) روبوتات مُنشَئون بتكنولوجيا النانو. ولكن من حيث ما هو ممكن تكنولوجيًّا بالفعل، فإن المحرك الجزيئي المصنوع منذ البداية بقابليته للتحكم، يكون في قرارته آلة إبداعية، وإن كانت بدائية. فباستخدام هذا الجهاز يمكن نقل القضبان والعوارض بمقاييسها الجزيئية وغيرها من أجزاء البناء والتركيب إلى أماكن تكون فيها جاهزة للالتحام والتجميع.

وفي حين تحصل البروتينات الحركية (أو المحركات) على طاقة تشغيلها من ثلاثي فوسفات الأدينوسين، يعتقد بعض الباحثين أن المحركات الجزيئية التخليقية يمكن تشغيلها بالطاقة الضوئية. وفي عام ١٩٩٩ ابتكر فريق من الكيميائيين يقوده بِن فرينجا في جامعة جرونينجن بهولندا محركًا جزيئيًّا دوَّارًا، يدور فيه داسر باتجاه واحد مدفوعًا بطاقة الضوء. وقد استخدموا عملية الأيسومرية (التجازئية) الضوئية؛ وهي عملية التحول المتبادل لصورتين مختلفتين من جزيءٍ ما (وتسمى تلك الصور الأيسومرات أو المتجازئات) يكون لهما نفس التكوين الكيميائي مع اختلاف الشكل.

صنع هذا الفريق جزيئًا يحتوي على وحدتين مرتبطتين شبيهتين بالمروحة أو الرفَّاص (شكل ٥-٦). في البداية كان الرفَّاصان يقعان على الجانبين المتضادين من الجزيء، وهو ما يسمى التماكب المفروق، ولكن الأشعة الضوئية فوق البنفسجية تحوِّل الجزيء إلى وضع التماكب المقرون؛ حيث يكون كلا الرفاصين في نفس الجانب. وحتى لا ترتطم ريشتا الرفاص إحداهما بالأخرى، فإنهما تلتويان، إحداهما لأعلى والأخرى



شكل ٥-٦: محرك جزيئي دوَّار مصنوع من الصفر، ويشتغل بالطاقة الضوئية. تُظهر الصورة العليا هيكل ذرات الكربون.

لأسفل. وإذا جرت تدفئة للجزيء لِمَا فوق ٢٠ درجة مئوية، فإن الريشتين تتحولان إلى الوضع المضاد؛ فالتي كانت تلتوي لأسفل تنثني لأعلى والعكس بالعكس. في هذا الوضع يكون الجزيء أكثر ثباتًا قليلًا، فإذا عرَّضناه لجرعة أخرى من الضوء فوق البنفسجي فإن هذا يُحدِث التحول العكسي من الوضع المقرون إلى الوضع المفروق، ولكن بسبب ما حدث قبلها من تقلقل للرفاص، فإن الوضع المفروق يكون الآن مختلفًا بعض الشيء

عما كان في البداية؛ إذ ينثني الرفاصان كلاهما للأسفل بدلًا من الأعلى، ويؤدي تسخين الجزيء إلى ٦٠ درجة مئوية إلى استعادة الوضع الأصلي.

والنتيجة الكلية لهذه العملية الرباعية الخطوات هي أن تصنع إحدى ريشتَي الرفاص دورة كاملة بالنسبة إلى الأخرى في اتجاه مقدَّر سلفًا. وإذا ظل الجزيء على درجة حرارة فوق ٦٠ درجة مئوية وعُرِّض لإشعاع مستمر من الضوء فوق البنفسجي فإنه يدور برفق، فيصير بهذا محركًا جزيئيًّا يشتغل بالطاقة الضوئية.

صُنع جهاز دوار آخر بأيدي روس كيلي ومساعدوه في كلية بوسطن؛ إذ أنشَئوا جزيئًا يتكون من رفاص ثلاثي الريشات يرتبط عن طريق محور دولابي بمكبح، وهذا المكبح بدوره يعوق دوران الرفاص. فمن دون المكبح يدور الرفاص عشوائيًّا في أيٍّ من الاتجاهين. كان الباحثون يهدفون إلى استخدام المكبح لقصر حركة الرفاص على اتجاه واحد فقط، وذلك بإجراء سلسلة من التفاعلات الكيميائية بين الريشة والمكبح، ولكنهم لم يتوصلوا حتى الآن لطريقة لدفع رفاصهم لأكثر من ثلث دورة كاملة.

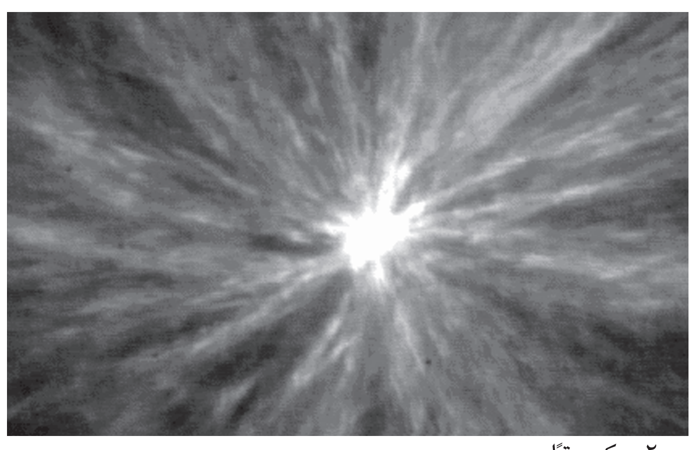
كلا الجهازين مُفرِطا التبسيط ولم يتسنَّ تسخير أيٍّ منها لأداء مهمة مفيدة، لكنهما يُظهران لنا مبدئيًّا كيف يمكن إنشاء محركات جزيئية. يبدو تتابُع صُنْع الروابط الكيميائية وكسرها — المطلوب لتحريك محرك كيلي — عملًا مرهقًا، ولكننا على أي حال نحتاج إلى تتابع مماثل لإحداث حركة خطية باستخدام الكينيزين والميوسين. ويمكن على المقياس الجزيئي أن تحدث هذه الأشياء بسرعة تكفي لإعطاء مظهر الحركة السلسة.

تكنولوجيا النانو الطبيعية

أمام المحركات الجزيئية التخليقية طريقٌ طويلٌ قبل أن يمكن مقارنتها بالبروتينات الحركية الطبيعية، فهل من المعقول إذن أن نحاول بناءها من لا شيء؟ أم هل يمكن بدلًا من هذا أن نكيف البروتينات الحركية كي تحقق غايات تكنولوجيا النانو؟ وقد استطاع بعض الباحثين عزل بروتينات حركية من الخلية وتعديلها كيميائيًّا بحيث يمكنها أداء مهام جديدة.

عام ١٩٩٧ صنع ستانيسلاس لايبلر ومساعدوه في جامعة برينستون أجهزة من بروتين الكينيزين الحركي أمكنها ترتيب الأنيبيبات الدقيقة في أنماط منظمة. فعملوا على ربط أربعة من جزيئات الكينيزين معًا كيميائيًّا، لتشكيل تركيبة أشبه ما تكون بكائن له أربعة أطقم من الأرجل. وحين خُلطت تكوينات الكينيزين هذه بالأنيبيبات الدقيقة

ولُقمت بثلاثي فوسفات الأدينوسين، جذبت الأنيبيبات الواحدة تلو الأخرى إلى أن رُتبت في هيئة تراكيب نجمية الشكل (شكل ٥-٧) شديدة الشبه بالتي تتكون في المراحل الأولى من الانقسام الخلوي (انظر الفصل الثالث).



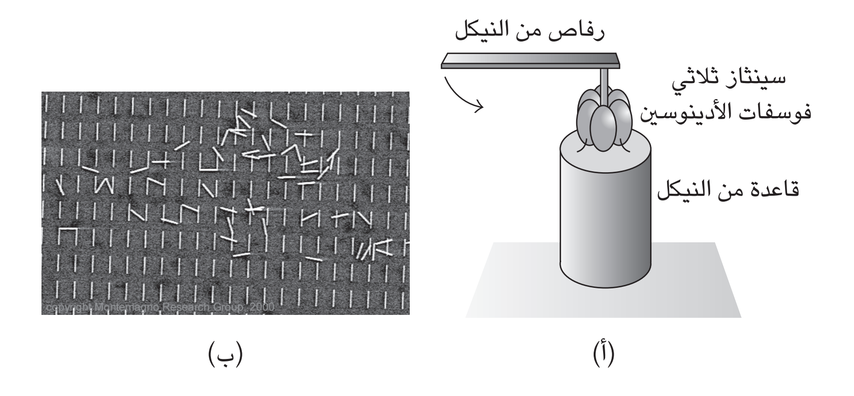
شكل ٥-٧: أنيبيبات دقيقة رتبتها في هيئة تراكيب نجمية محركاتٌ جزيئية نصف تخليقية صُنعت من بروتينات معدلة.

وفي جامعة ولاية واشنطن بمدينة سياتل الأمريكية استخدمت فيولا فوجل ومساعدوها الكينيزين لدفع الأنيبيبات الدقيقة فوق الأسطح في اتجاه معين مُختار. فألصقوا جزيئات الكينيزين على سطح مغطًّى بمادة بوليمرية تسمَّى بولي تترا فلورو إيثيلين، الشهيرة أكثر باسم التفلون، تلك المادة المانعة للالتصاق. ووضعت طبقة التفلون عن طريق حك كتلة من تلك المادة فوق السطح المطلوب تغطيته؛ حيث تكتسب طبقة البوليمر حزوزًا وأضلاعًا في اتجاه الحك. يُعتقد أن سلاسل البوليمر تصطف بمحاذاة هذه الأضلاع، وتلتصق جزيئات الكينيزين بالأضلاع بشكل تفضيلي؛ بما يعني أنها تكوِّن صفوفًا موجهة، وتعمل هذه الصفوف كمسالك خطية يمكن إمرار الأنيبيبات الدقيقة عن طريقها؛ فتمر جزيئات الكينيزين عبر الأنيبيبات على التوالي، الواحدة تلو الأخرى مثل

فرقة الدلاء (التي تمر عبرها الدلاء من شخص لآخر لإطفاء حريق). في الخلايا تكون جزيئات الكينيزين هي المتحركة والأنيبيبات هي «الثابتة»، ولكن في هذه التجارب تكون البروتينات المحركة مثبتة إلى السطح؛ ومن ثم تعمل حركات مشيها على دفع الأنيبيبات الدقيقة.

إن أكثر عمليات الاندماج إثارة للاهتمام حتى الآن بين حقل المحركات الجزيئية الحيوية والهندسة الدقيقة (المجهرية) الاصطناعية جرت قرب نهاية عام ٢٠٠٠ على يد العالم كارلو مونتيمانيو ومساعدوه في جامعة كورنيل بمدينة إيثاكا بنيويورك؛ إذ جعلوا محركًا جزيئيًّا «دوارًا» يدير رفاصًا معدنيًّا دقيقًا عرضه حوالي ١٥٠ نانومترًا وطوله قدر هذا بعَشْر مرات تقريبًا. يملك إنزيم سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين، الذي مررنا به آنفًا، رأسًا يدور حول مغزل محاط بغشاء أثناء أدائه لمهمته من تحويل ثنائي فوسفات الأدينوسين إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين (انظر الفصل الرابع). وثبَّت مونتيمانيو ورفاقه هذا الرأس فوق قاعدة مجهرية الحجم حفرت من معدن النيكل، ثم ثبتوا الرفاص المعدني بالمغزل. في الظروف المواتية يمكن أن يعمل سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين في اتجاه عكسي، فيحلل ثلاثي فوسفات الأدينوسين إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين، ويمارس حركته الدوارة أثناء ذلك. وقد بدأ الباحثون هذه العملية بتلقيم محركاتهم الدوارة بثلاثي فوسفات الأدينوسين وراقبوها وهي تدور تحت المجهر بمعدل حوالي خمس دورات في الثانية (شكل ٥-٨).

إن دراسات كهذه تحفز العلماء الطامحين لاستخدام المحركات الجزيئية في تحريك الجزيئات هنا وهناك بطريقة تخضع للتحكم، وهو ما يضفي بُعدًا جديدًا على عملية التخليق على المقياس الجزيئي. لم يَعُد يتعين على العلماء أن يعتمدوا على تجوال الجزيئات عشوائيًّا وعلى المصادفة التي تحدث لجزيئات تطفو في المحلول، بل يمكنهم بدلًا من هذا أن يوجهوا تلك الجزيئات بدقة إلى حيث يريدون لها أن تذهب. ولأن الطبيعة قد ابتكرت لنا بالفعل تشكيلة مدهشة من الآلات الجزيئية لتلك الأغراض؛ فإنني أتوقع أن يستفيد علماء تكنولوجيا النانو بشكل متزايد في المستقبل من الآلة الخلوية بدلًا من أن يكتفوا بمحاولة تصميم أدوات على أسس أولية. وهذا لا ينطبق فقط على توليد الحركة الميكانيكية، ولكن أيضًا على مجالات مثل توليد الطاقة، وأجهزة الاستشعار ومعالجة المعلومات. وربما نرى حينئذٍ اندماجًا بين علم الأحياء وفروع من العلم كانت في الماضي تعتبر مختلفة تمامًا، مثل الهندسة الميكانيكية والإلكترونية. ولأننا نعتقد أن هذا الاندماج



شكل ٥-٨: رفاص معدني مجهري متصل بمغزل البروتين المحرك الدوار سينثاز ثلاثي فوسفات الأدينوسين (أ) وهو يدور حين يُدفع المحرك بواسطة ثلاثي فوسفات الأدينوسين. يظهر الشكل (ب) مجموعة من تلك الإنشاءات الجزيئية. الخطوط غير الرأسية الظاهرة هنا تعبِّر عن الرفاصات التي أدت عملها كما ينبغي، أما الأخرى فهي علامة على أن عملية التخليق لا تكون ناجحة في كل الأحوال.

ستنجم عنه نتائج لم يكن أيٌّ من تلك الحقول العلمية ليحققها من تلقاء نفسه، فبإمكاننا إذن أن نطلق على هذا الاندماج الناتج اسم «الهندسة التوافقية الحيوية».

الفصل السادس

توصيل الرسائل: الاتصالات الجزيئية

إن كل فرد عالَم مستقل بذاته. وتكشف النظرة الجزيئية للحياة عن أن الخلية تشبه بحق مدينة تعجُّ بسكانها من الجزيئات؛ ومن ثم فإن أجسادنا العديدة الخلايا هي تجمعات متعاونة من مجتمعات سكانية، وكل خلية تتصل وتتواصل مع الأخرى كما تفعل لندن مع ليفربول، ونيويورك مع فيلادلفيا؛ إذ تمرُّ الرسائل عبر الأسلاك أو تُحمَل من مكان لمكان. تُنقَل البضائع الحيوية هنا وهناك على طول شبكة نقل تتمثل في الجهازين الدوري والليمفاوي. وكما قال بيرسيليوس: «إن القوة اللازمة للحياة هي نتيجة التأثير المتبادل بين الأدوات والعناصر.»

طالما كانت البيولوجيا الجزيئية قانعة بمجرد ذكر نبذة عن الشبكات الاجتماعية للخلية؛ إذ تستنتج أي الجزيئات تتحدث فيما بينها، وكيف تأتي وتذهب. ولكن هذا لا يكفي على أي حال، بل يلزمنا أن نعرف أيضًا ما يقال، وكيف تُنقل الرسائل بين الجزيئات. هذه المعلومات يمكن أن تفيد الكيميائي الصيدلاني في استحداث العقاقير، ويتمثل التحدي الأساسي حيال العلوم الطبية في معرفة كيفية المشاركة في المحادثات الجزيئية بالجسم؛ لتفسير الرسائل الضارة أو غير السارة ولإرسال رسائل تحذير جديدة، ولمنع التفاعلات غير المرغوبة.

ونتيجة لهذه الجهود التي تبذل في حقل الكيمياء الحيوية، صارت الكيمياء نفسها تخضع الآن لما يشبه إعادة الاختراع؛ فخيال الكيميائيين يشتعل بفعل ما يرونه محتملًا في علم الأحياء. ورغم أن الكثير من صناعة الكيماويات مكرس لتصنيع منتجات «سلبية» — مثل أنواع البلاستيك الجديدة، والأسمنت والغراء والدهانات، والألياف الاصطناعية — فإن جزيئات العقاقير تُعد شيئًا مختلفًا دائمًا؛ لأن مهمتها المشاركة في عملية ديناميكية، والانخراط في حياة الخلية النشطة. إنها تشبه ممثلين دُرِّبوا على أداء الأدوار الدرامية، وفي

الواقع، كثيرًا ما يلعبون أدوارهم عن طريق تقمص الشخصية. لقد بدأ الكيميائيون الآن يدركون أن هذا النوع من الدِّيناميكية يمكن أيضًا تحقيقه في الأنظمة الكيميائية التخليقية بالكامل؛ ومن ثم بدأت الكيمياء يقل اهتمامها شيئًا فشيئًا بخصائص الجزيئات المفردة، ويزيد اهتمامها بكيفية سلوك مجموعات الجزيئات المختلفة معًا؛ من حيث تكوين العلاقات وتحطيمها، وتعديل بعضها ميول بعض، وإرسال الإشارات. إن الكيمياء في طريقها لأن تصير علمًا يتعلق بـ «العمليات».

هذا هو التوجه الذي تقوم عليه الكثير من الجهود والأبحاث العلمية التي ناقشتُها في هذا الكتاب؛ مثل استحداث الخلايا الشمسية الجزيئية، وأجهزة الاستشعار الكيميائية، وعلم تكنولوجيا النانو الجزيئية، والأجهزة الجزيئية التي تعالج المعلومات. وقد جُمع الكثير من الأبحاث في هذا المجال تحت مظلة ما تسمَّى «الكيمياء فوق الجزيئية»، التي تتعدى الدراسة العادية للجزيء، إلى علم الجزيئات وهي تتواصل.

في هذا الفصل سوف أستكشف قليلًا من الطرق التي تتواصل بها الجزيئات في علم الأحياء، قبل أن أقدم لمحة عن إمكان استحداث نزعة اجتماعية مماثلة في الجزيئات التخليقية. كما هو الحال دائمًا، يجب أن نتذكر أن الطبيعة، وإن كانت ملهمة موحية، يعتبرها البعض بخيلة وعمياء أحيانًا. يستخدم علم الأحياء نطاقًا محدودًا من المواد، ولديه ميل لأقلمة حل جيد لأغراض جديدة بلا حدود أكثر مما يهتم باستكشاف سبيل جديد تمامًا في كل مرة. وكما أن طائرة الجامبو النفاثة ليست مجرد حمامة هائلة الحجم، فعلى مهندس الجزيئات الذكي أن يأخذ من الطبيعة المبادئ وليس المخططات الفعلية.

البريد الجزيئي

لقد صارت إيطاليا وألمانيا دولتين حين وافق الخليط المتنافر من الممالك الصغيرة والولايات على أن يحترموا وجود سلطة مركزية ويتضامنوا معًا من أجل صالحهم المشترك. وكذلك جسم الإنسان لا يستطيع التصرف ككيان مترابط ما لم تفعل خلاياه هذا بالمثل؛ هذا يعني أنه لا بد من آليات لإرسال الأوامر والمراسيم والاستدعاءات للعمل في جميع أنحاء ذلك العالم الجسماني. وتُعد الإشارات العصبية الآتية من المخ إحدى الوسائل التي عن طريقها ينسق الجسم أفعاله؛ فهي منظومة الجسم الهاتفية.

ولكن الرسائل العامة المرسلة في نطاق «عام» لأنحاء الجسم تشبه كومة من البريد أطلقت إلى مجرى الدم، في صورة جزيئات تسمى «هرمونات»، وهذه تتنوع

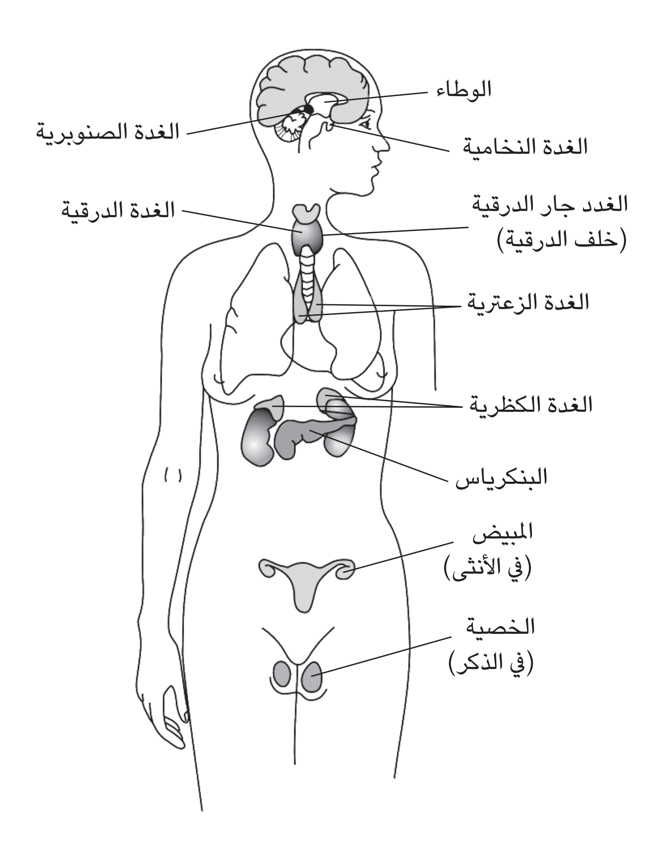
في تكوينها ووظيفتها؛ فبعض الهرمونات بروتينات كبيرة الجزيئات، والبعض الآخر جزيئات عضوية صغيرة، وبعضها قابل للذوبان والبعض الآخر غير قابل للذوبان في الماء (بما يعني أن الجزيئات الحاملة مطلوبة لحملها في تيار الدم)، وبعضها ينقل رسائل فورية عاجلة مثل: «اهرب!» والبعض الآخر له تأثيرات طويلة الأمد؛ كتعزيز النمو، أو تطور الخصائص الجنسية.

إن جميع الهرمونات هي من إفراز «جهاز الغدد الصماء»؛ وهي سلسلة من الغدد التي تشكِّل الجهاز التنظيمي المهيمن على الجسم بكامله (شكل ٦-١). رأينا آنفًا كيف يتحكم هرمونا الإنسولين والجلوكاجون اللذان يفرزهما البنكرياس في محتوى سكر الدم (انظر الفصل الرابع)، وبالمثل فإن معدل العمليات الأيضية في الخلايا ينظمه هرمونا الثيروكسين وثلاثي أيودثيرونين اللذان تفرزهما الغدة الدرقية؛ فهذه الهرمونات تؤثر على إنتاج الطاقة واستهلاك الأكسجين، ويحدث هذا جزئيًّا عن طريق تغيير معدل دقات القلب.

يقع مركز التحكم في جهاز الغدد الصماء في الوطاء، وهي غدة في المخ، ويرتبط الوطاء بالغدة النخامية التي تستقر تحته مباشرة، والتي تخرج منها الهرمونات إلى الغدد الأخرى؛ فمثلًا، إذا حدث انخفاض في معدل الأيض، فهذا يحث الوطاء على إرسال جزيئات من هرمون يسمى الهرمون المُطلِق للثيروتروبين إلى الغدة النخامية، وهذه الغدة بدورها تبدأ في إرسال الهرمون المنبه للغدة الدرقية، فيحثها على ممارسة نشاطها.

إن جميع الهرمونات المُفرَزة من الغدة النخامية هي من الببتيدات؛ وهي جزيئات شبه بروتينية صغيرة. الهرمون المضاد لإدرار البول — على سبيل المثال — يتحكم في المحتوى المائي للجسم عن طريق تنظيم إنتاج البول في الكليتين، ويمثل هرمون النمو محفزًا للتكاثر الخلوي، ويلعب دورًا رئيسيًّا أثناء مرحلتَي الطفولة والمراهقة، كما ينشط النمو الموضعي للأنسجة عند الحاجة لإجراء إصلاحات فيها، كما يحدث مثلًا أثناء الْتئام الجروح.

تصنع الغدتان الكظريتان (فوق الكلويتين) بعض الهرمونات الستيرويدية المهمة، وهي جزيئات غير قابلة للذوبان في الماء، لها هيكل كربوني يتكون من عدد من الحلقات الصغيرة المرتبطة معًا. بعض الستيرويدات، مثل الكورتيزول، تنظِّم عمليتَي تخزين موارد الطاقة بالجسم واستخدامها، وتحويل الجلوكوز إلى جلايكوجين وتفكيك البروتينات إلى أحماض أمينية. والكثير من ممارسي كمال الأجسام والرياضيين عامة يستخدمون هذه الهرمونات (بشكل قانوني وغير قانوني) لبناء كتلة الجسم والعضلات.



شكل ٦-١: جهاز الغدد الصماء في الجسم، وهي سلسلة من الغدد المفرزة للهرمونات.

هرمون الأدرينالين هو أيضًا من إفراز الغدة الكظرية؛ إذ يتم إطلاقه مع زميله هرمون النورأدرينالين سريعًا إلى مجرى الدم كاستجابة للتوتر. وكلا الهرمونين يسرعان معدل دقات القلب ويوسعان الأوعية الدموية؛ مما يزيد إمداد العضلات بالأكسجين حتى يتم تحضيرها لأقصى درجات الجهد.

أما الغدد الجنسية — وهما الخصيتان في الرجل والمبيضان في المرأة — فتفرز الهرمونات التي تميِّز بين الجنسين وتحث على إحداث التغيرات في النمو أثناء البلوغ. يحفز التستوستيرون إنتاج الحيوانات المنوية في الرجال، بينما يتحكم الإستروجين

والبروجستيرون في الدورة الحيضية الأنثوية، ويُنظِّم إفرازهما من خلال هرمونان يُفرَزان من الغدة النخامية، يسميان الهرمون المنبه للحويصلات المبيضية وهرمون اللَّوْتَنة (أو هرمون الجسم الأصفر).

هذان الهرمونان ينظمان عملية التبويض أثناء الدورة الحيضية. في الأيام الأولى من الحمل ترتفع مستويات الإستروجين والبروجستيرون في مجرى الدم؛ مما يسبب تثبيطًا لإفراز كلٍّ من الهرمون المنبه للحويصلات وهرمون اللوتنة وتثبيطًا للتبويض. تتسم حبوب منع الحمل بنفس التأثير؛ إذ تحتوي على الإستروجين والبروجستيرون اللذين يوهمان جسم المرأة بأنها حامل.

ينخفض إفراز هرمون الإستروجين حين تصل المرأة إلى عقد الثلاثينيات من عمرها، ويزداد هذا الانخفاض أثناء مرحلة اليأس من المحيض. ويسبب انخفاض مستويات الإستروجين آثارًا جانبية من أهمها زيادة القابلية للإصابة بمرض الشرايين التاجية بالقلب وهشاشة العظام، ويعدان سببين من الأسباب الرئيسية التي تدعو إلى تقديم الإستروجين كعلاج هرموني تعويضي. ولكن يبقى هذا العلاج مثيرًا للجدل؛ إذ إن إعطاء جرعات من الإستروجين على المدى الطويل يمكن في حد ذاته أن يسبب آثارًا جانبية غير مرغوبة، من أخطرها زيادة قابلية إصابة النساء بسرطان الثدي وبصور مختلفة من أمراض القلب.

الهرمونات في وضع التشغيل

كيف تتم قراءة الرسالة الهرمونية؟ يعتمد هذا على طبيعة هذه الرسالة؛ فبعض الهرمونات يمكن إمرارها مباشرة عبر جُدُر الخلايا، حيث ترتبط بأحد البروتينات المستقبلة؛ وهذا يحفز البروتين المستقبل على نسخ جين معين يحث على صنع البروتين الذي تحتاجه الخلية. هذه الآلية الجينية المباشرة للنشاط الهرموني تصلح للهرمونات التي تكون جزيئاتها صغيرة وغير قابلة للذوبان في الماء؛ ومن ثم يمكن أن تخترق الغشاء الخلوي الدهني.

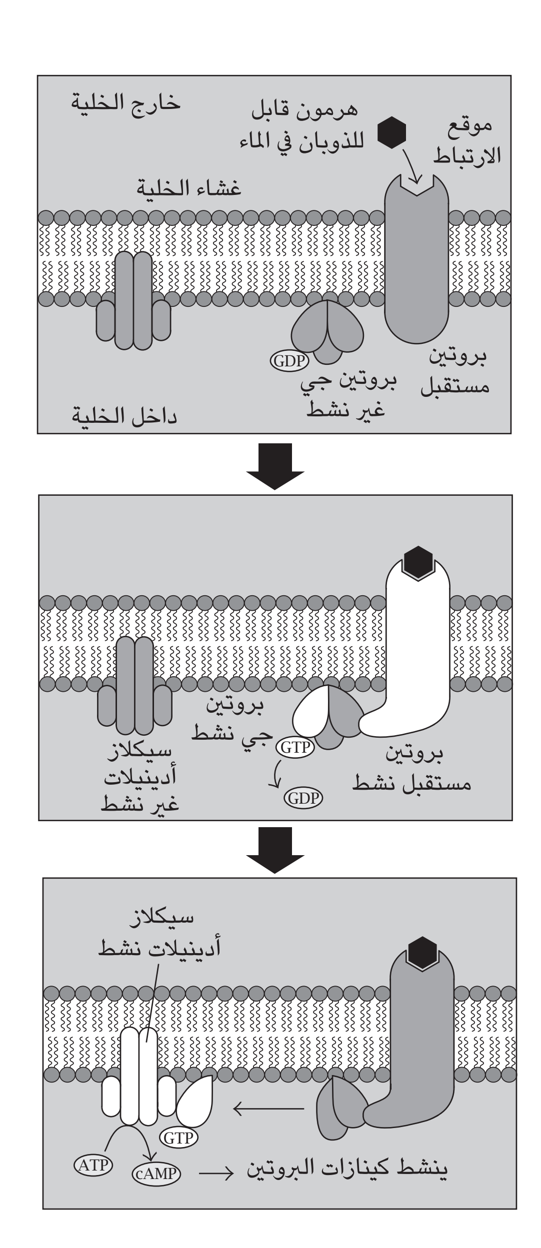
ولكن الكثير من الهرمونات، لا سيما التي تتكون من جزيئات ببتيدية وبروتينية، تكتفي فقط بدق أبواب الخلية؛ إذ يتلقاها وسطاء عند سطح الخلية، وهي البروتينات المستقبِلة التي تكون مهمتها توصيل الرسالة إلى البروتينات الأخرى داخل الخلية.

شأن أغلب أنشطة الاتصال الجزيئية الأخرى، يعد نقل رسالةٍ ما من الهرمون إلى البروتين المستقبل أمرًا حميمًا، فلا تبدي الجزيئات أي مظاهر تثبيط، بل تتحدث بعضها إلى بعض من خلال «معانقات» لصيقة. ولأن الجزيئات تفتقر إلى أي وسائل تعارف أخرى؛ فإن بعضها يتعرف إلى البعض الآخر عن طريق «التلامس»، من خلال عمليات الارتباط التي يقابل فيها المستقبِل هدفًا ما ويمسك به (الركيزة)، يكون له الشكل الصحيح تمامًا، كما يدخل المفتاح في القفل المناسب له. لكل بروتينٍ مستقبِلٍ للهرمون على سطح الخلية موقعُ ارتباط «نُحِتَ» بحيث يناسب الهرمون تمامًا ويحتويه.

رغم تنوع الرسائل الكثيرة التي تنقُلها الهرمونات، فإن الآلية التي تمر بمقتضاها الإشارة من البروتين المستقبل عند سطح الخلية إلى ما بداخل الخلية هي آلية واحدة في جميع الحالات تقريبًا، وتتضمن تتابعًا من التفاعلات الجزيئية التي يحوِّل فيها بعض الجزيئات البعض الآخر على طول سلسلة ترحيلية. يسمَّى هذا في علم بيولوجيا الخلايا باسم «تحويل الإشارات». وفي نفس وقت حدوث ترحيل الرسالة، تعمل هذه التفاعلات على تضخيم الإشارة بحيث يتسبب «رُسُوُّ» جزيء هرموني واحد على مستقبِلٍ ما في إحداث استجابة كبيرة داخل الخلية.

الأمر يحدث على النحو التالي: تنتشر البروتينات المستقبِلة بعرض الغشاء الخلوي بكامله، ويَبرز موقع ارتباط الهرمون من السطح الخارجي، بينما تَبرز قاعدة المستقبِل من السطح الداخلي (شكل ٦-٢). وحين يرتبط المستقبِل بهرمونه المستهدف، ينتقل ما يحدث من تغيُّر في الشكل إلى الوجه السفلي من البروتين، وهو ما يمكنه من أن يعمل كإنزيم.

إن العملية التي يحفِّزها الإنزيم هي عملية «تفعيل» لِمَا يسمى البروتين «جي»، الملتصق بالسطح الداخلي للغشاء الخلوي. والبروتين جي هو اختصار للفظ «بروتين ربط نيوكليوتيد الجوانين»، ويرتبط هذا البروتين بجزيء من ثنائي فوسفات الجوانوسين. وحين يتفاعل مستقبل مشحون بالهرمون مع بروتين جي المحمَّل بثنائي فوسفات الجوانوسين (جي دي بي)، فإن البروتين جي يبدأ أولًا في التخلص من ثنائي فوسفات الجوانوسين ليحل محله ثلاثي فوسفات الجوانوسين (وهو مناظر لثلاثي فوسفات الأدينوسين الغني بالطاقة)، ثم يتفكك إلى نصفين. يصير النصف الذي يربط ثلاثي فوسفات الجوانوسين (جي تي بي) إنزيمًا، وينتقل لكي ينشِّط إنزيمًا آخر عند السطح السفلي للجدار الخلوي، وكثيرًا ما يكون هذا الإنزيم الآخر هو سيكلاز الأدينيلات، وهو بروتين يحول ثلاثي فوسفات الأدينوسين إلى أحادي فوسفات أدينوسين حلقي (سي إيه إم بي).



شكل ٦-٢: طريقة عمل بروتينات جي.

ويلتصق المشاركون في جميع هذه العمليات بالجدار الخلوي، ولكن أحادي فوسفات الأدينوسين الحلقي يطفو بحُرية في سيتوبلازم الخلية، ويكون قادرًا على حمل الإشارة إلى ما بداخل الخلية. وهو يسمى «المرسال الثاني»؛ إذ إنه العامل الذي يُرحِّل إشارة «المرسال الأول» (أي الهرمون) إلى مجتمع الخلية. ويصبح أحادي فوسفات الأدينوسين الحلقي ملتصقًا بجزيئات بروتينية تسمى «كينازات البروتين»، التي بدورها يتم تنشيطها كإنزيمات. وأغلب إنزيمات كينازات البروتين تشغِّل وتطفئ الإنزيمات الأخرى عن طريق إلصاق مجموعات فوسفاتية بها، وهو تفاعُل يسمى «الفسفتة». تُحدث كينازات البروتين شلالًا من التفاعلات؛ إذ يمكن أن يؤثر كل كيناز منشِّط على العديد من الجزيئات الإنزيمية، يمكن أن يؤدي كلٌّ منها مهمته بدوره مرات كثيرة. وبهذه الطريقة فإن رُسُوَّ هرمون واحد على مستقبِله يمكن أن يؤثر على جزيئات كثيرة داخل الخلية؛ أي إن الإشارة يتم تضخيمها.

قد تبدو هذه العملية معقدة بعض الشيء، ولكنها في حقيقتها ليست أكثر من عملية ترحيل جزيئية؛ إذ يتم إمرار الإشارة من الهرمون إلى مستقبله ثم إلى البروتين جي، ومنه إلى أحد الإنزيمات؛ ومن ثم إلى المرسال الثاني، ثم إلى كيناز بروتين، وهلم جرًّا.

اكتُشفت آلية البروتين جي لتحويل الإشارات في سبعينيات القرن العشرين على يد ألفريد جيلمان ومارتن رودبل، ونالا بسبب ذلك جائزة نوبل في الطب عام ١٩٩٤. وهي تمثل واحدة من أكثر الوسائل انتشارًا لنقل رسالة عبر غشاء خلوي. بعض الهرمونات تضعف العمليات الخلوية بدلًا من أن تُنبِّهَها، وفي تلك الحالات قد يكون لبروتينات جي المنشَّطة تأثير مثبط لإنزيماتها المستهدفة بدلًا من أن تنشطها. وفي حالات أخرى قد يكون المرسال الثاني جزيئًا صغيرًا غير جزيء أحادي فوسفات الأدينوسين الحلقي؛ إذ تحفز بروتينات جي مُنشَّطة معينة انطلاق أيونات الكالسيوم من بروتين رابط للكالسيوم يسمى كالموديولين، على سبيل المثال.

ليست عمليات إرسال الإشارات الهرمونية هي وحدها التي تستخدم آلية البروتين جي، بل إن حاستَي البصر والشم، اللتين تشملان أيضًا إرسالًا للإشارات، تَستخدمان نفس عملية التحويل. إن سقف التجويف الأنفي مبطن بأعضاء للإحساس بالشم تسمى الشعيرات الأنفية، تلتصق بنهايات الخلايا العصبية التي تحمل الإشارات إلى البصلة الشمية، والتي هي «مركز الشم» في المخ. تمتلئ جُدُر خلايا الشعيرات الأنفية ببروتينات مستقبلة مصممة للارتباط بجزيئات معينة ذوات رائحة تدخل الأنف.

هناك مئات الأنواع المختلفة من مستقبِلات الرائحة، وكلٌّ منها له موقع ارتباط شُكِّل ليستوعب مادة شائعة معينة ذات رائحة. ويمكننا مع ذلك أن نميز بين نطاق من الروائح أوسع من هذا؛ لأن كل رائحة تكون بشكل مميز نتاجًا لتوليفة معقدة من جزيئات مختلفة ذوات رائحة. وتصنع البصلة الشمية «صورة» للرائحة الآتية من خليط من النبضات التي تتلقاها من مستقبلات مختلفة، ويشبه هذا بدرجة كبيرة تعرفنا على وجه شخصٍ ما من مجموع الأجزاء المختلفة المكونة لوجهه.

وعند وصول إشارات الشم، يرتبط أحادي فوسفات الأدينوسين الحلقي الذي تنتجه بروتينات جي ببروتين غشائي يسمى «قناة الصوديوم»؛ حيث تنفتح القناة وتدع أيونات الصوديوم تتدفق إلى داخل الخلية. يُحدث هذا نبضة عصبية، وهذه تمر إلى البصلة الشمية، ونفس العملية الأساسية تولد إشارات بصرية في العصب البصري حين ينبهه الضوء.

يُعزى إحساسنا بالذوق بدرجة كبيرة إلى جهازنا الشمي، وتستطيع براعم الذوق في ألسنتنا تمييز عدد محدود فقط من أنواع إشارات الذوق البسيطة نسبيًّا؛ وهي: الحلاوة والمرارة والملوحة والحموضة. وإن ما نشعر به من لذة إذا أكلنا جبنًا ناضجًا أو خبزًا طازجًا يأتي أغلبه من جزيئات الرائحة والنكهة التي تطلقها.

كل ذلك في عقلك

يمكن أن تنشِّط الهرمونات شبكات معقدة من الأفعال الكيميائية الحيوية، ولكن الرسائل التي تحملها تعد بسيطة بالفعل، وتتعلق بمطالب النمو وضرورات البقاء. وإنه لأمر مختلف تمامًا أن يُنتج التواصل بين الجزيئات أعمالًا بشرية رائعة مثل كاتدرائية سيستين أو أوبريت الناي السحري أو اكتشاف نظرية النسبية، إلا أن العقل البشري، على أي حال، مصنوع من جزيئات.

في الوقت نفسه، لا يزال العقل يثير الحيرة، ويعتبر واحدًا من الألغاز العظيمة الباقية في مجال العلوم. يذهب بعض العلماء إلى أن العقل لن يكون قادرًا أبدًا على فهم نفسه بالكامل، وأن الطبيعة المرجعية الذاتية لهذه المشكلة سوف تخلق دائمًا نقاطًا عمياء، بينما يعتقد آخرون أن هناك تفسيرًا علميًّا للوعي يلوح في الأفق. وفي أيٍّ من الحالتين، من المرجح أن أسرار المخ تكمن فيما وراء عالم الجزيئات بكثير، مدفونة في تساؤلات عن سلوك شبكات معلومات معقدة وشديدة الترابط. وهنا نرى مواطن قصور النظرة

الاختزالية؛ إذ إن العمليات الجزيئية الخاصة بالتفكير صارت الآن مرسومة بالتفصيل جيدًا، إلا أن تبعاتها المجمعة لم يتم تبيُّنها إلا بالكاد.

يحتوي المخ على ما يتراوح بين مليار ومائة مليار من الخلايا العصبية أو «العصبونات». ولا أذكر هذا العدد كدلالة على الكثرة، فهناك أعضاء كثيرة بالجسم أكثر ازدحامًا بالخلايا نسبيًّا، ولكن الصفة المميزة للمخ هي تعقيد شبكة الاتصال بين الخلايا العصبية تلك؛ فكل عصبون له حوالي ألف رابطة؛ ومن ثم قد يصل عدد الروابط البينية في المخ إلى مائة تريليون؛ وهو حوالي نفس عدد النجوم في ألف مجرة مثل مجرتنا «درب التبانة». وفي شبكة نقل كهذه يمكن أن يضل المرء طريقه في لحظة. لا تُقارب دوائرُ الكمبيوتر المخَّ من حيث درجة التواصل ولو من بعيد، ولا عجب إذن أن نجد الكمبيوترات بكل سرعتها العملية المشهودة، تخفق بشكل مؤسف في إنجاز بعض المهام التي يستطيع طفل أداءها في ثانية واحدة.

ترسل العصبونات إشارات عصبية — هي في حقيقتها نبضات كهربائية — فيما بينها على طول قنوات أنيبيبية تسمى المحاور العصبية. وينتهي كل محور عصبي بسلسلة من الفروع التي تدفع أطرافها أغشية عصبونات أخرى. وعند هذه الوصلات — التي تسمى التشابكات العصبية — تُنقل الإشارة العصبية من عصبون إلى آخر. كما أن العصبونات نفسها يَخرج منها الكثير من الفروع الأقصر طولًا، التي تشبه تفرعات الشجيرات؛ ومن ثم تسمى «الزوائد الشجرية»، وهي تجمع المعلومات من محاور خلايا عصبية أخرى، وعلى هذا تُعتبر تلك المحاور العصبية سبل المواصلات المخية؛ إذ تمتد من مدينة عصبونية إلى التي تليها، وتنتهي في طرق تتجمع فيها التشابكات حتى تصل إلى منظومة طرق المدينة من الزوائد الشجرية.

ورغم أن إشارات المحاور العصبية إشارات كهربائية في طبيعتها، فإنها تختلف عن تلك التي تسري في الأسلاك المعدنية والدوائر الإلكترونية؛ فالمحور العصبي هو أساسًا غشاءٌ خلويٌّ أنيبيبيٌّ تخترقه على طول مساره قنوات دقيقة تمرُّ من خلالها أيونات الصوديوم والبوتاسيوم دخولًا وخروجًا. بعض تلك القنوات الأيونية تكون مفتوحة باستمرار، والبعض الآخر يكون محروسًا ببوابات (أو صمامات) تُفتح أو تُغلق استجابة للإشارات الكهربائية الواردة إليها، وبعضها لا يُعتبر قنوات حقيقية، بل هي مضخات، تنقل أيونات الصوديوم بفعالية إلى مخارج الخلية وأيونات البوتاسيوم إلى داخلها. ومضخات الصوديوم والبوتاسيوم هذه يمكنها أن تحرِّك الأيونات في الاتجاه

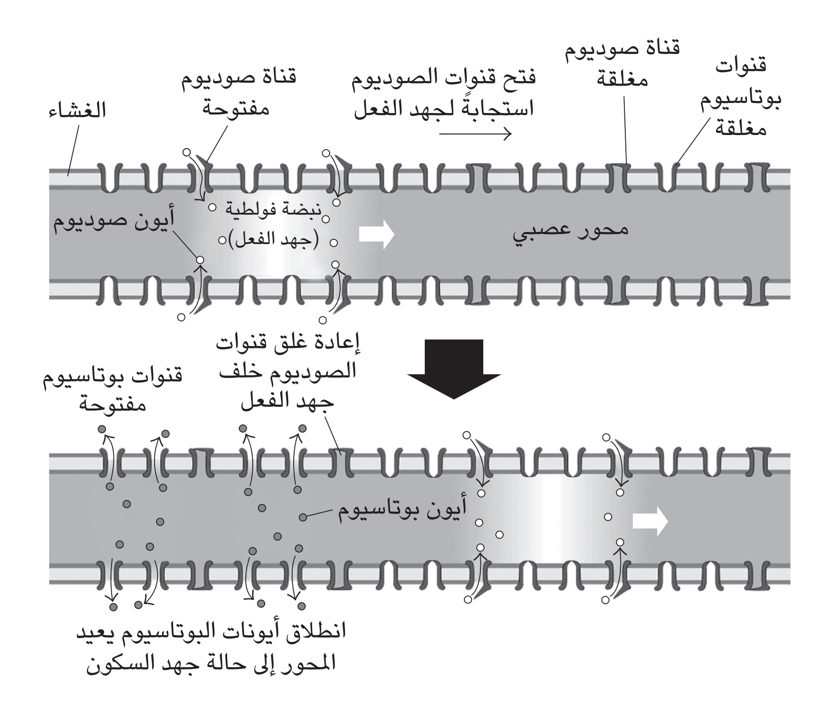
«التصاعدي»؛ أيْ من مناطق من التركيز المنخفض إلى مناطق من التركيز المرتفع؛ وذلك لأنها مشحونة بثلاثي فوسفات الأدينوسين.

المحور العصبي في حالته «الساكنة» يتَّسم بعدم توازن بين أيونات الصوديوم والبوتاسيوم داخله وخارجه؛ مما يسبب فرقًا في الشحنات أو الفولطية (فرق في الجهد الكهربي)، عبر غشائه، فيكون للسائل الذي في داخله شحنة سالبة صغيرة (وتسمى «جهد السكون») مقارنة بالتي في خارجه. وحين تُرسَل إشارة على طول المحور، تنفتح بعض قنوات الصوديوم ذوات البوابات؛ مما يغير توزيع الأيونات ويقلب حالة عدم التوازن، إذ يصير ما بداخل المحور مشحونًا بشحنة موجبة مقارنة بما هو خارجه. وهذه المنطقة من الفولطية المعكوسة تعمل على فتح قنوات الصوديوم الواحدة تلو الأخرى بحيث تتحرك هذه الحالة على طول المحور العصبي، وفي الوقت نفسه تنغلق القنوات التي في الوراء الواحدة تلو الأخرى، ويُستعاد جهد السكون. وبهذه الطريقة تنتقل نبضة الفولطية أو ما يسمى «جهد الفعل» على طول المحور (شكل ٦-٣).

وعند التشابك العصبي، تنتقل هذه النبضة العصبية من المحور إلى عصبون آخر. بصفة عامة، تتحول الإشارة أولًا من صورة كهربائية إلى صورة كيميائية؛ إذ يوجد مرسال جزيئي صغير يسمى «الناقل العصبي» ينقل الإشارة عبر ذلك الفراغ (المسمى «الحيز التشابكي») الواقع بين الغشاء النهائي للمحور العصبي وغشاء عصبون آخر. يُختزَن ذلك الناقل العصبي داخل غشاء يشبه الفقاعة مندمجٍ مع الجدار الخلوي المحوري ويطلق الرسالة الجزيئية إلى الحيز التشابكي، وينتقل إلى السطح الخارجي للغشاء العصبوني الآخر؛ حيث يصير مرتبطًا بالبروتينات المستقبِلة.

هناك تنوع واسع من الجزيئات التي تعمل كنواقل عصبية؛ فبعضها أحماض أمينية بسيطة، مثل الجلايسين والجلوتامات؛ أو جزيئات مشتقة منها، مثل السيروتونين والدوبامين. ويُعد جزيء الأسيتيل كولين ناقلًا عصبيًّا يحمل رسائل بين الجهاز العصبي المركزي والخلايا العضلية عند الوصلات العصبية العضلية (انظر الفصل الخامس)، وحين يرتبط الأسيتيل كولين بمستقبِله عند خلية عضلية، فإن المستقبل يتحول إلى قناة صوديوم مفتوحة، فتندفع أيونات الصوديوم إلى داخل الخلية؛ مما يغير الفولطية عبر الغشاء الخلوي ويفتح قناة كالسيوم ذات فولطية محكومة. وهذا يسبب ارتفاعًا في تركيز أيون الكالسيوم داخل الخلية؛ الأمر الذي يحفز الانقباض العضلي.

يعد الأسيتيل كولين مثلًا واضحًا على الوظيفة العامة للناقل العصبي؛ الذي يفتح قناة أيونية أو يغلقها؛ ومن ثم يغير الفولطية عبر الغشاء الذي يستقر فيه المستقبل،



شكل ٦-٣: تُرسَل النبضات الكهربائية على طول المحور عن طريق فتح القنوات الأيونية وغلقها.

وهذا يحوِّل الرسالة الكيميائية لتعود إلى حالتها الكهربائية. ويؤدي الأسيتيل كولين مهمته مباشرة؛ إذ إن مستقبِله هو في حد ذاته قناة أيونية، ولكن بعض مسارات النواقل العصبية الأخرى تمارِس وظيفتها بطريقة مختلفة بعض الشيء؛ إذ تستخدم مرسالًا ثانيًا لنقل الرسالة من الناقل العصبي إلى قناة أيونية، مع وساطة كذلك من بروتينات جي.

هل يثير الدهشةَ أن تظهر آلية تحويل إشارة البروتين جي في كثير جدًّا من المواقع المختلفة؟ ليس حقيقة، فمع تطور الكائنات المتعددة الخلايا وزيادة درجة تعقيدها، ظهرت خلايا لها وظائف أكثر تخصصًا ورُقيًّا من أسلاف مشتركة لها وظائف أكثر عمومية. احتفظت الكائنات بما لديها من آليات مجرَّبة لأداء مهام معينة، وإن كانت

مؤقلمة حسب الظروف الضرورية. ومن ثم فإننا، في نهاية الأمر، نتشارك كبشر في بعض الجينات مع الخميرة والبكتيريا. ويعتبر مسار البروتين جي وسيلة فعالة لإمرار رسالة كيميائية من خارج غشاء حيوي إلى داخله، وتضخيمها من خلال هذه العملية؛ وبذا يكون شعار الخلية: إذا كان هذا الأمر ناجحًا، فالْتمس وسيلة لاستخدامه!

السعادة والألم

تُعد عملية النقل العصبي هدفًا كيميائيًّا شائعًا للعقاقير؛ ومنها ما هو نافع، أو ضار، أو مثير للبهجة، أو الأمور الثلاثة كلها، حسب الجرعة المستخدمة. والجهاز العصبي من أكثر أجزاء الجسم حساسية للأذى، فإذا أعيقت النبضات العصبية فيه فلن تستطيع الحركة. وهناك الكثير من الحيوانات التي تفرز سمومًا تسبب الشلل لفرائسها عن طريق الإضرار بمضخات الصوديوم والبوتاسيوم التي ذكرناها أو القنوات الأيونية ذوات البوابات الفولطية التي في المحاور العصبية؛ مما يعوق سريان جهد الفعل.

يتأثر النشاط العضلي أيضًا بجزيئات العقاقير التي تشبه الأسيتيل كولين؛ ومن ثم تتنافس معه في الارتباط بالبروتينات المستقبِلة عند الوصلات العصبية العضلية. والنيكوتين — المكوِّن الفعال للتبغ — هو واحد منها؛ فهو يرتبط بنوع معين من مستقبِلات الأسيتيل كولين في العضلات ويسبب الأحاسيس التنبيهية المصاحبة، مثل زيادة معدل دقات القلب واتساع حدقتَي العينين. ولكن ليس مفهومًا تمامًا السبب في شعور المدخن بالتلذذ بالتدخين. الكورار سم قاتل يوجد في لحاء أحد النباتات الاستوائية بأمريكا الجنوبية، وكان السكان المحليون من الهنود الحمر يستخرجونه ويسمِّمون به أطراف سهامهم. يرتبط الكورار بنفس النوع من مستقبِلات الأسيتيل كولين مثل النيكوتين، ولكنه لا ينشطها، بل يَحدُث العكس؛ إذ يمنع النشاط العضلي ويُحدِث الشلل في العضلات. وإذا سُمِّم حيوان بالكورار فإنه يموت بالاختناق نتيجة لشلل العضلات التنفسية؛ مما يسبب عدم القدرة على ملء الرئتين بالهواء. يعمل الشوْكَران السام، الذي كان يُستخدم في القرون الوسطى، بنفس الكيفية أيضًا.

وبينما يعمل بعض النواقل العصبية على تنبيه العصبونات يكون دور البعض الآخر هو تهدئتها، والحد من جهد الفعل. يوصف هذا الدور بأنه تثبيطي، ويشمل استخدام الجلايسين وجزيء مهم آخر هو حمض جاما أمينو بيوتريك. تُعد أفكارنا تفاعلًا معقدًا من التنبيه والتثبيط؛ إذ تقيِّم العصبونات الإشارات المختلفة التي تتلقاها من جيرانها،

وتقرر إن كان يجب عليها، وهي في حالة اتزانها، أن تعمل بشكل جماعي أم لا. وهناك عقاقير تسمى عقاقير الهلوسة مثل إل إس دي (ثنائي إيثيل أميد حمض الليسرجيك) والمسكالين، تهيج المخ بشكل زائد عن طريق تعزيز التأثيرات التنبيهية للسيروتونين. ويعمل سم الإستريكنين على إعاقة الإشارات المثبطة؛ مما يؤدي إلى تشنجات عضلية، لا تخضع للتحكم، وموت بغيض. وتساعد العقاقير المهبطة على ربط النواقل العصبية المثبطة أو تعمل (كما في حالة الكحول) على إعاقة مفعول النواقل العصبية المنبهة.

يميز العقاقير المسكِّنة للألم أنها تتكفل بالمستقبلات التثبيطية؛ فالمورفين — وهو المكون الفعال الأساسي في الأفيون — يرتبط بما تسمى المستقبلات شبه الأفيونية في الحبل الشوكي، وهو ما يثبِّط انتقال إشارات الألم إلى المخ. كما توجد أيضًا مستقبلات شبه أفيونية في المخ ذاته؛ ولهذا يكون للمورفين وغيره من العقاقير الأفيونية ذوات الصلة تأثير عقلي فضلًا عن التأثير الجسدي. هذه المستقبلات الواقعة في المخ هي مواقع ربط للجزيئات الببتيدية، وتسمى الإندورفينات (أي المورفينات الداخلية)، التي ينتجها المخ كرد فعل للألم، وبعضها في حد ذاته يعتبر من مسكنات الألم الشديدة القوة.

أيضًا ترتبط القنبينويدات — وهي المكونات الفعالة للقنب — بمستقبلات عصبية تثبيطية في المخ لتحدث تسكين الألم. والهدف الطبيعي لهذه المستقبلات هو جزيء يسمى أناندامید وهو مثل الإندورفين، ينتج كرد فعل لإشارات الألم. كما يوجد جزيء آخر وثيق الصلة به يسمى أولياميد، يبدو أنه المادة الكيميائية الحيوية التي تحث على النوم الطبيعي.

ليست كل العقاقير المخففة للألم (المسكنات) تعمل عن طريق إعاقة إشارة الألم؛ فبعضها يمنع الإشارة من أن تُرسَل أصلًا. تبدأ إشارات الألم من ببتيدات تسمى البروستاجلاندينات، وهذه يتم صنعها ثم إطلاقها من الخلايا الواقعة تحت ضغط. يلتصق الأسبرين (حمض أسيتيل ساليسيليك) بأحد الإنزيمات المسئولة عن تصنيع البروستاجلاندين ويثبطه؛ مما يقطع صرخة الألم عند منبعها. ومما يؤسف له أن مركَّبات البروستاجلاندين هذه مسئولة أيضًا عن إنتاج المخاط الذي يحمي بطانة المعدة (انظر الفصل الرابع)؛ ولهذا نجد من الآثار الجانبية للأسبرين احتمال الإصابة بقروح المعدة.

من الاكتشافات الحديثة المثيرة للدهشة في علم الأعصاب أن الجزيئات غير العضوية الشديدة الصغر يمكن أيضًا أن تعمل كنواقل عصبية؛ فأول أكسيد الكربون وأكسيد

النيتريك — وكلاهما من الجزيئات ثنائية الذرات — يمارسان هذه الوظيفة، وكلاهما يكونان سامَّين بجرعات كبيرة؛ لأنهما يتنافسان مع الأكسجين في الارتباط بهيموجلوبين الدم. إلا أن السمِّية تتوقف على الجرعة، فإذا أُخذ أكسيد النيتريك بكميات صغيرة، فإنه يفعل أشياء مهمة؛ إذ يحث على توسيع الأوعية الدموية؛ مما يمكن أن يخفف التوتر عن القلب ويفرج النوبة القلبية؛ ولهذا يُعطَى النيتروجلسرين، الذي يتحلل وينطلق منه أكسيد النيتريك، لعلاج المشكلات القلبية. وهذا التحسن في الدورة الدموية الذي يبدؤه أكسيد النيتريك، يشكِّل الأساس لعقَّار الفياجرا، الذي يستخدم لعلاج ضعْف الانتصاب عند الرجال.

الكيمياء فوق الجزيئية

في العقود الأخيرة، أصبح العلماء مهتمين في طرقهم التخليقية بمحاكاة بعض عمليات التواصل الجزيئية في الخلية، وهناك الكثير من الدوافع لهذا الأمر. كثيرًا ما يتم استحداث العقاقير وتطويرها كعملية علمية تنكرية بارعة؛ بحيث يمُر الجزيء المخلَّق كجزيء طبيعي ويرتبط تفضيليًّا بأحد المستقبلات؛ مما يؤدي إلى بدء إشارة كيميائية حيوية أو إعاقتها. وقد أوحت عملية تحويل الإشارات في خلايا شبكية العين وفي الجهاز الشمِّي إلى العلماء بفكرة أجهزة الاستشعار الجزيئية التي يمكنها أن تحس بالضوء أو بالجزيئات الأخرى بدرجة حساسية عالية. ويتطلع مهندسو الجزيئات إلى الجهاز الشمِّي كي يستلهموا منه تصميم أنوف اصطناعية يمكنها التعرف على أخلاط معقدة من المكونات الجزيئية.

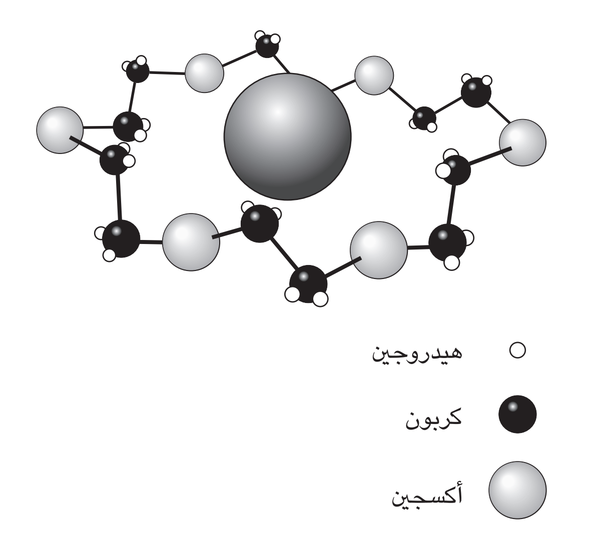
من المبادئ الحاضرة بشكل واضح حولنا في الطبيعة مبدأ «القفل والمفتاح»؛ إذ إن الجزيئات لا يتصل بعضها ببعض إلا حين تتوافق توافقًا تامًّا.[١] ولكي يتحول هذا الحدث «التعارفي» إلى عملية تواصل، يجب أن يُحدِث الحدث الرابط بعض التغيير في المستقبِل الذي يسمح له بأن يُرحِّل الإشارة مع اتجاه التيار. في علم الأحياء، كثيرًا ما تكون عملية الترحيل هذه مُحفَّزة بإنزيم؛ إذ تحوِّل عملية الربط المستقبَل إلى إنزيمٍ فعال. ولكن قد يتم إمرار الإشارة أيضًا بطرق أخرى مثل إطلاق الضوء، أو تحرير إلكترون، أو (كما في حالة مستقبل الأسيتيل كولين) بإحداث جهد كهروكيميائي.

يعد بناء عمليات التحول الاصطناعي للإشارات على المستوى الجزيئي هدفًا شائعًا في الكيمياء فوق الجزيئية. منذ بداية هذا الفرع العلمي وهو يتلقى الإلهام من علم

الأحياء؛ ففي ستينيات القرن العشرين، عمل الكيميائي الفرنسي جان ماري لين على تقصِّي ما سُمِّيت جزيئات الإيثير التاجية، التي يمكنها أن تتعرف على أيونات فلزية معينة وأن ترتبط بها. كان لين مهتمًّا بنقل أيونات مثل الصوديوم والبوتاسيوم عبر الأغشية الدهنية، ورغم أن هذا يمكن إنجازه من خلال قنوات ومضخات بروتينية، فإن هناك استراتيجية أخرى بابتلاع الأيون ضمن جزيء يمكن أن «يذوب» في الطبقة الداخلية الدهنية من جدار الغشاء. هذه الجزيئات موجودة في الطبيعة وتسمى «حاملات الأيونات»، ومن أمثلتها النمطية الفالينومايسين؛ وهو ببتيد حَلْقيٌّ الشكل له ثقب مركزي يمكن إدخال أيون بوتاسيوم فيه بحيث يتلاءم معه. والإيثيرات التاجية هي محاكيات تخليقية للفالينومايسين، وهي أيضًا حلقية الشكل، ويمكنها أن تربط أيونًا فلزيًّا في تجويفها المركزي، ويكون هذا الأيون مثبتًا بشكل مستقر تقريبًا اعتمادًا على الأحجام النسبية لكلٍّ من الأيون والفتحة الجزيئية التي هو فيها، فإذا كانت الفتحة أكبر من اللازم، فإن الفلز «يتقلقل» فيها ويكون سائبًا، وإذا كانت الفتحة أصغر من اللازم فلن تكون مناسبة؛ ومن ثم يمكن توفيق الإيثيرات التاجية وتهيئتها لتناسب أيونات فلزية معينة، أو لتُظهر تعارفًا جزيئيًّا بتعبير آخر.

ومع حلول سبعينيات القرن العشرين تَمكَّن لين وآخرون من صنع جزيئات مستقبلة تخليقية بجميع الأشكال والأحجام، لها تجاويف صُمِّمت لتستوعب مدًى واسعًا من الجزيئات العضوية وغير العضوية المستهدفة. هذه الجزيئات «المستضافة» تُثبَّت في أماكنها عن طريق تفاعلاتها مع مضيفيها الذين يُعتبرون ضعافًا مقارنة بالروابط التساهمية التي تضم الذرات معًا في الجزيئات أنفسها، وبهذه الطريقة يمكن أن تُلتقَط الجزيئات المستضافة وأن تُطلَق مجددًا. هذه هي الطريقة التي يعمل بها الفالينومايسين كناقل للأيونات الفلزية؛ فهو يقبض على الأيونات عند أحد جانبَي الغشاء ويطلق سراحها مجددًا من الناحية الأخرى. وتختص الكيمياء فوق الجزيئية أساسًا بضم الجزيئات معًا لتشكيل تجمعات سائبة يمكن تفكيكها مجددًا إلى مكوناتها المنفصلة.

حين تأخذ الإيثيرات التاجية أيونًا فلزيًّا، فإنها تغير أشكالها. حين تكون بمفردها تكون في شكل حلقات مرنة سائبة بعض الشيء مثل الرباط المطاطي، لكن حين يدخل أيون فلزي في قلبها، فإنها تتحول عضويًّا إلى تراكيب صلبة نسبيًّا، تحتوي فيها الحلقة على زوايا متعرجة؛ أيْ إنها تكون تاجية الشكل (شكل ٦-٤). وتكون تغيرات الشكل من هذا النوع شائعة حين يربط المستقبِل جزيئه المستهدف.

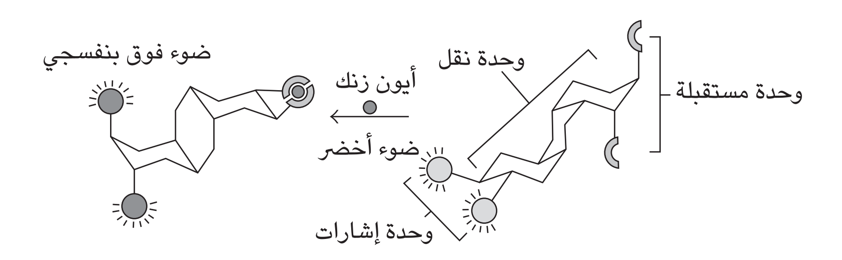


شكل ٦-٤: الإيثير التاجي جزيء حلقي يقبض على أيون فلزي في تجويفه المركزي.

إذا كان الربط وحده هو الهدف، فلن يكون إجراء تغيير كبير في الشكل أمرًا مرغوبًا فيه بشدة؛ إذ إن إجراءات إعادة الترتيب الداخلية في المستقبِل ستشكل عبئًا ثقيلًا على عملية الربط الجزيئي، وقد تجعل تحقيقها متعذرًا؛ ولهذا السبب يُصمَّم الكثير من تلك المواد المضيفة فوق الجزيئية على أساس «تنظيمها عضويًّا مسبقًا» لتستقبل ضيوفها؛ مما يقلل التغير الشكلي الناتج عن عملية الربط.

لكن إذا كانت الفكرة هي استخدام الربط كمحفز يحث على ترحيل إشارةٍ ما، فهُنا يكون تغير الشكل مهمًّا. وقد وصف في عام ٢٠٠٠ أولريش كورن ومعاونوه بجامعة هومبولت في برلين بألمانيا حدوثَ تغيير مثير خاص في الشكل بتأثير الربط بين المضيف والضيف؛ إذ أنشَئوا جزيئًا مستقبلًا يمكن اعتباره سلسلة من «الوحدات المنفصلة»؛ فله ذراعان وساقان ووحدة «تحويل» تشبه جذعًا قابلًا للانثناء يصل ما بين الذراعين والساقين. وحين تمسك الذراعان بأيون من الزنك، فإن وحدة التحويل ترتجُّ وتجذب الساقين مباعدة بينهما (شكل ٦-٥)، ويكتسي طرفا الساقين بمجموعتين لهما إشعاع فلوريسي، وتغيِّران الطول الموجي لانبعاثهما — من الأخضر إلى ما فوق البنفسجي —

حين تزداد المسافة بين الساقين. وقد أوضح الباحثون كيف أن هذا المستقبل الجزيئي يُظهر بعضًا من خصائص المستقبِل البروتيني المشتغل بتحويل الإشارات؛ إذ يستجيب لربط الهدف عند أحد الطرفين بأن يغير شكله؛ ومن ثمَّ يبدل سلوكه عند الطرف الآخر.



شكل ٦-٥: جزيء محوِّل اصطناعي يحول ربط أيون من الزنك إلى عملية إرسال للإشارات، وذلك بتغيير شكله وتبديل خواصه الإشعاعية.

ذلك التغير في الشكل الذي يبدل خصائص الجزيء المشع للضوء قد تمت هندسته في مستقبِلات تخليقية أخرى عديدة. بيد أن استخدام عمليتَي التعرف والربط لتحويل السلوك التحفيزي للجزيء — كما في آلية إرسال الإشارات التي تخص البروتين جي — هو أمر أكثر صعوبة إلى حد ما؛ لأن هذا يعني ضمان أن يكون الشكل النهائي هو المطلوب تمامًا حتى يؤدي المحفز عمله. والأصعب من هذا مهمةُ تنظيم جزيئات عدة في عملية ترحيل كي تحمل رسالة مع اتجاه التيار. ومع ذلك، فإن مهارة علماء الكيمياء فوق الجزيئية تتزايد يومًا بعد يوم، ولن يثير دهشتنا أن نرى بعد فترة قصيرة اختراعات اصطناعية لأنظمة تَواصُل جزيئي تُحاوِل مضاهاة تعقيد الأنظمة التي يستخدمها الجسم في تسيير عالمه بشكل متناغم.

هوامش

(١) كان أول من استخدم هذا التعبيرَ المجازيَّ الكيميائيُّ الألمانيُّ إميل فيشر في عام ١٨٩٤ ليشرح مدى انتقائية الإنزيمات فيما يتعلق بعمليات التحول التي تحفزها.

الفصل السابع

الكمبيوتر الكيميائي: المعلومات الجزيئية

في النهاية يظل السؤال عينه ماثلًا أمامنا: ما هي الحياة؟ لن أجيب عن هذا السؤال، أو على الأقل لن أجيب عنه هنا، ولكن إجابة شرودنجر عن الإنتروبيا السالبة (انظر الفصل الرابع)، رغم كل مثالبها، تحتوي على ذرة من الحقيقة؛ فمن خصائص الحياة الضرورية، وإن كانت غير كافية، أنها تفرض النظام على الفوضى، والفوضى تعني الموت. فإذا لم تستطع الخلايا أن ترسل رسائل واضحة وأن تستقبلها، أو إذا كانت تفعل الأشياء في الوقت غير المناسب، أو إذا فقدت أغشيتها نظامها، أو إذا أخفقت البروتينات في الطي؛ فلا يمكن حينئذٍ أن تستمر الحياة؛ فنحن جُزر حيَّة من النظام العضوي في خضم عالم بري.

فمن أين أتى هذا النظام؟ يمكن أن ينشأ النظام العضوي تلقائيًّا في المادة غير العضوية أيضًا؛ فَكِّرْ في تلك الصفوف المتعرجة من السُّحب الشبيهة بذيل الفرس، أو التموجات المنتظمة من الرمال التي حرَّكَتها الرياح، يبدو على الأرجح أن هذا النوع من «التنظيم الذاتي» — الذي يمكن أن ينشأ طواعيةً في أنظمة غُذِّيت بالطاقة التي تمنعها من تحقيق توازن استاتيكي — له دور يلعبه في نظام الحياة واستقرارها. ولكن هذا ليس كافيًا؛ فنوع التناسق الذي تحتاجه الخلية لكي تنسخ كروموسوماتها، وتنقسم إلى خليتين، أو لتصنع جزيئًا بروتينيًّا يمارس وظائفه ويتكاثر، أو حتى لتنمو من بويضة مخصَّبة واحدة، وصولًا إلى تكوين إنسان متعدد الخلايا قد يكون عبقريًّا أو نابغة مثل موتسارت؛ لا يمكن أن يعتمد على عمليات رسم الأنماط «العمياء» الصارمة التي تحدِّد أشكال السماء والرمال وألوانها؛ فلا بد أن يكون الأمر أكثر إحكامًا مثل إحكام اليد على عجلة القيادة.

سمعنا جميعًا عما تتكون منه هذه اليد القائدة، إنه الدِّي إن إيه؛ ذلك الخيط المكوَّن من خرزات جزيئية تقطَّعت وحُزِمَت لتشكِّل تلك الكروموسومات البشرية الصغيرة الشبيهة بالحرف X وعددها ستة وأربعون. إن الجينوم البشري — الذي هو المجموعة الكاملة من الدِّي إن إيه — كثيرًا ما يسمى «كتاب الحياة». وأثناء كتابتِي لهذه السطور، كان العلماء قد فرغوا توًّا من فك شفرة أول مسودة من هذا الكتاب، ووضعوا بمزيد من التفصيل مخططًا لرسائل الجزيئات في كلٍّ من الكروموسومات.

ذاعت أقاويل عجولة خرقاء عن مشروع رسم خريطة للجينوم البشري. فسمعت، على سبيل المثال، أن المهندس الذي يحظى بقدر كافٍ من البراعة يمكنه أن يصنع بشرًا من المعلومات المتاحة حاليًّا. وهذا هراء بالطبع؛ فجسم الإنسان مليء بالجزيئات غير المشفَّرة في الجينوم، فالجينوم يحوي بروتينات فقط، وحتى تلك تكون في صورة مشوَّهة وغير كاملة. لا يخبرنا الجينوم شيئًا عن الدهون التي تشكل الأغشية الخلوية، ناهيك عن معرفة كيفية تحفيزها بقوًى فيزيائية لتتجمع في شكل صفائح ودوائر وكرات. كذلك، لن تخبرنا الجينات شيئًا عن كيفية بث الإشارات العصبية وتشفير الدماغ للأفكار والأحاسيس في تتابعات من النبضات الكهربائية التي يكون زمنها محددًا بدقة. لا يوجد جين للعَظْم ومينا الأسنان، إن الجينوم هو كتاب الخلية بقدرِ ما أن القاموس هو كتاب مسرحية «في انتظار جودو». إنه موجود، ولكن ليس في وسعك أن تستنتج جينومًا من معرفة جينوم غيره.

ومع ذلك، فالجينوم هو كتيب تعليمات في صورة جزيئية، وهو يخبرنا بكيفية صنع البروتينات، وهي الجزيئات التي تقود أوركسترا مسرحية الحياة الجزيئية المثيرة للإعجاب. وأريد في هذا الفصل أن أذكر قدرًا أكبر قليلًا عن طبيعة ذاك السيناريو؛ كيف يُقرأ وكيف تُمثَّل أدواره. إلا أن مقصدي النهائي أوسع من هذا. بالنسبة إلى عالِم الجزيئات، فإن علم الجينات يقول شيئًا مثيرًا وعميقًا حقًّا عن الجزيئات، وهو أن الجزيئات بإمكانها أن تحمل المعلومات وتنقلها. يشير عالِم البيولوجيا النظرية جون هوبفيلد من جامعة برنستون إلى أن هذا الأمر واحد من السُّبل الكثيرة التي يقدم من خلالها علم البيولوجيا «نظرية وجودية» تلهم الكيميائيين، ويقول: «يستخدم علماء الرياضيات هذا المصطلح عند الإشارة إلى إثبات على أن ثمة وظيفة يريدون إنشاءها موجودة بالفعل وليست شيئًا محالًا. وبهذا المعنى، فإن ملاحظة الطيور وهي تطير تقدِّم لنا نظرية وجودية مفادها أن المهندس يجب أن يكون قادرًا على تصميم آلة طائرة.»

بنفس الطريقة، يُظهِر لنا علم الجينات أن من الممكن إجراء عملية الحوسبة باستخدام الجزيئات؛ فالحوسبة ليست سوى عمليات تخزين للمعلومات ونقلها وتحليلها، وكل تلك العمليات يمكن أن تنفذها الآلة الجينية. ويردف جان ماري لين قائلًا: «هناك حقًّا منطق جزيئي لدى الكائنات الحية.»

وهذه في الواقع نتيجة طبيعية للفصل السابق؛ حيث رأينا أن الجزيئات يمكن أن تتواصل فيما بينها. ويعتبر المنطق الجزيئي الأصيل أكثر دقة؛ إذ لا يتطلب فقط أن يؤثِّر أحد الجزيئات على سلوك جزيء آخر، ولكن أن يكون بإمكان تلك الجزيئات أن تنقل وتعالج المعلومات المشفرة بطرق محددة جيدًا، وهكذا يعمل الكمبيوتر؛ بأن يمرر البيانات بين مفاتيح التحويل والذاكرة المصنوعة من مواد شبه موصلة ومغناطيسية.

إن الحوسبة باستخدام الجزيئات هي مجرد واحدة من الطرق التي من خلالها يدخل بُعد المعلومات علم الجزيئات. وأقول بشكل أكثر عمومية إن الكيميائيين صاروا معتادين على فكرة أن الجزيئات يمكن برمجتها لكي تتصرف بطرق معينة، وأن خصائصها يمكن كتابتها في نسيج الجزيء تمامًا كما يمكن برمجة مجموعة من التعليمات في روبوت. ويستطرد لين قائلًا: «وما أراه ... أننا نتجه إلى علمٍ عامٍّ من المادة القائمة على المعلومات.» هذه الكيمياء الجديدة هي علم جديد بالفعل، وهي من طرق كثيرة تختلف تمامًا عن الكيمياء التقليدية التي تصنع مواد مفيدة. إنه علم يهتم بما يمكننا «فعله» وليس فقط ما نحن عليه؛ وهو يحدث بالفعل لنا، ولا نعرف إلى أين سيأخذنا.

كيف «تكون» الخلية على ما هي عليه؟

كل كتاب مكتوب بلغة معينة، ولا يشذ الجينوم عن هذه القاعدة. ولغة الجينات هي شفرة بسيطة، حروفها هي الجزيئات النيوكليوتيدية الأربعة التي تمثِّل خرزات قلادة الدِّي إن إيه الجزيئية (انظر الفصل الثاني). ويحتوي كل جزيء من هذه الجزيئات على ما تسمَّى قاعدة، وهي التي تشفِّر المعلومات. وهناك أربع قواعد للدِّي إن إيه: الأدينين والسيتوسين والجوانين والثايمين (A, C, G, T). ولأن الدِّي إن إيه هو بوليمر خطِّي من النيوكليوتيدات، فإن المعلومات التي تحل شفرتها يمكن تمثيلها كخيط من هذه الحروف الأربعة، وقد يبدو جزء من الخيط بهذا الشكل:

GTGGATTGACATGATAGAAGCACTCTACTATATTC

وقد تبدو أبجدية تتألف من تلك الحروف الأربعة كنظام قاصر يعيقنا بعض الشيء عن كتابة رسائل معقدة. ولكن لو فكَّرنا في هذا التتابع كشفرة بدلًا من كونه أبجدية صارمة، فإنه يمكن أن يكون بدرجة التعقيد التي نرغبها. فبإمكاننا، مثلًا أن ندل على كل حرف في الأبجدية الرومانية بسلسلة من عدة قواعد بأن نقول مثلًا إن GTG تُقابِل الحرف الأبجدي a، وGAT تقابل الحرف b، وهكذا دواليك. ويكون عدد تباديل الحروف الأربعة في مجموعات ثلاثية؛ أربعةً وستين، وهو أكثر مما يكفي لتشفير الأبجدية كلها. وباستخدام تلك الشفرة نستطيع أن نكتب الكتاب المقدس كخيط من هذه الحروف الأربعة وحسب.

ليست الخلية معنية بالطبع برسالة الكتاب المقدس، بل ما تحتاجه الخلية هي رسائل لصنع البروتينات. تتحدد الطريقة التي تنثني بها أيُّ سلسلة بروتينية على أساس تتابع الأحماض الأمينية فيها (انظر الفصل الثاني)؛ ومن ثم فإن المعلومات اللازمة لصنع بروتينٍ ما تكون محددة بصفة مميزة بهذا التتابع. ويعمل الدِّي إن إيه على تشفير هذه المعلومات باستخدام شفرة تُشْبه تلك التي افترضتها أعلاه؛ إذ تمثِّل مجموعات من ثلاث قواعد كل حمض أميني، وهذه هي الشفرة الجينية.[١]

لا يزال من غير المفهوم جيدًا كيف يتولى تتابُعٌ بروتينيٌّ معينٌ تحديدَ طريقةِ انثناءِ سلسلتِه؛ وهذا يعني أننا لا نستطيع أن نستنتج وظيفة جين ما من تتابعه وحده (رغم أن بإمكاننا في بعض الحالات أن نخمن بشكل جيد). وأول مخطط للجينوم البشري مليء بجينات لم تُعرف وظائفها.

ومع ذلك، فإن مبدأ تدفق المعلومات في الخلية واضح، والدِّي إن إيه هو كتاب معلومات عن البروتينات. يمكننا أن نفكر في كل كروموسوم كفصل منفصل، وفي كل جين ككلمة في هذا الفصل (وهي كلمات طويلة جدًّا!) وفي كل مجموعة تتابعية من ثلاث قواعد في الجين كحرف في الكلمة. تُعَد البروتينات ترجمات للكلمات إلى لغة أخرى، وحروفها هي الأحماض الأمينية، وبصفة عامة لا يتسنى لنا فهمُ ما تعنيه اللغة الجينية إلا حين تُتَرجَم.

الدِّي إن إيه هو بوليمر خيطي مزدوج؛ تلتفُّ فيه سلسلتان إحداهما حول الأخرى على شكل لولب مزدوج. ويتكون كل خيط منهما من تسلسُل من النيوكليوتيدات التي تحوي معلومات مشفرة. ولكن الخيطين ليسا متطابقين، وهما يلتصقان معًا بواسطة رابطة هيدروجينية أشبه بالسحَّاب (انظر الفصل الثاني) تجمع بين القواعد التي على

أحد الخيطين والتي على الخيط الآخر. ورغم أن كل القواعد يمكنها أن تشكِّل روابط هيدروجينية، فإن لها تفضيلات محددة في علاقاتها التزاوجية؛ إذ يلتصق الأدينين مع الثايمين والجوانين مع السيتوسين. ومن ثم يكون للَّولب الثنائي من الدِّي إن إيه تتابعات متكاملة؛ فأينما ظهر الأدينين في أحد الخيطين، ظهر الثايمين في الآخر، وهكذا؛ وهذا يعني أن كل جين مكتوب في نسختين، كل منهما بمنزلة صورة مرآة للأخرى.

وهذه العلاقات الخاصة من الشراكة بين القواعد إنما تمليها عليها أشكالها؛ إذ إن قاعدتَي الأدينين والجوانين جزيئان متماثلان، وكذلك الثايمين والسيتوسين. ومن ثم يكون للزوج «أدينين-ثايمين» نفس الشكل والحجم العامَّيْن مثل الزوج «جوانين-سيتوسين» إلى حد كبير، ويشير هذان الزوجان للداخل فيما بين الخيطين الملتفَّين مثل درجات سلم لولبي. ولأن درجات السلم كلها بنفس الحجم، فإن الخيطين يلتفَّان بالتساوي. ومن شأن اقتران الأدينين بالجوانين أن يُحدث بروزًا، ويؤدي التشوه الناتج إلى الإخلال بثبات هذا الزوج. وبالمثل، إذا حدث اقتران بين السيتوسين والثايمين فسيكون ثمة اختناق في اللولب المزدوج. في نفس الوقت فإن اقتران الأدينين مع السيتوسين والجوانين مع الثايمين ليس مرجحًا بسبب اختلاف أوضاع مجموعات روابط الهيدروجين في هذين الزوجين من القواعد؛ ومن ثم تعتبر تفضيلات الاقتران نوعًا من الملاءمة الجيدة — أو الحالة «التكميلية» — بين الشريكين.

وهذه واحدة من النقاط المهمة عن تدفق المعلومات البيولوجية؛ فنَقْل البيانات يَحدث عبر عمليات التعرف الجزيئية، التي تضمن أن كل جزء من الرسالة تتم قراءته بشكل صحيح.

حين تنقسم الخلية يَحدث تضاعف للدِّي إن إيه، فتتكون نسخة من الجينوم. ولأن الخيطين متكاملان، فكلٌّ منهما يمكن أن يعمل كقالب لِيُتم تركيب الآخر عليه. فإذا كان الأدينين يقترن تفضيليًّا على الدوام مع الثايمين، وهكذا، فإن تتابع خيط واحد «مجرد» سيرشد النيوكليوتيدات غير المرتبطة لكي تصطفَّ في النسق السليم لتكوين الخيط التكميلي.

ولكي يعمل الخيط المفرد كقالب، يتم فصمه عن شريكه بالاستعانة بإنزيمات خاصة، ثم يتم ضم الخيطين التكميليين على طول كلٍّ من الخيطين المكشوفين. ويعمل إنزيم يسمى بوليمراز الدِّي إن إيه على تحفيز إضافة كل نيوكليوتيد جديد؛ ومن ثم يحتوي كلٌّ من اللولبين المزدوجين الجديدين على خيط واحد من اللولب الأصلي.

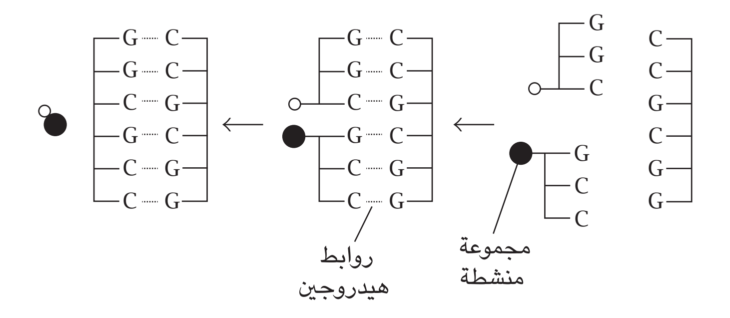
ورغم أن الإنزيمات تساعد في إنجاز العملية قُدُمًا، فإن المعلومات الأساسية المطلوبة لعملية النسخ تكون قد كتبت بالفعل في قوالب الدِّي إن إيه. في مستهل ثمانينيات القرن الماضي، أظهر ليزلي أورجل في معهد سولك في كاليفورنيا ومساعدوه أن النيوكليوتيدات المفردة يمكن تركيبها في شكل بوليمرات على قالب من النيوكليوتيدات التكميلية دون مساعدة من الإنزيمات؛ فعلى سبيل المثال، يمكن أن يعمل خيط من ثمانية نيوكليوتيدات آر إن إيه حاملةٍ للسيتوسين كقالب لربط ثمانية نيوكليوتيدات حاملةٍ للجوانين. ولكن أورجل لجأ للغش قليلًا باستخدام نيوكليوتيدات جوانين كان قد تم تنشيطها بإضافة مجموعة كيميائية تفاعلية؛ مما ساعد على ربط النيوكليوتيدات معًا.

وهذه البلمرة بمعونة القوالب ليست — في حد ذاتها — عملية تضاعف؛ إذ إن الخيط الجديد يكون مكملًا بالنسبة إلى القالب وليس مطابقًا له. كان أول مثال للتضاعف الجزيئي الاصطناعي الأصيل قد أثبته في عام ١٩٨٦ العالِم الكيميائي الألماني جونتر فون كيدروفسكي، فاستخدم نفس عملية القولبة، ولكنه اختار قالبًا ذاتي التكميل، فكان المكمل لِذَاته. كان القالب جزيء دي إن إيه من ستة نيوكليوتيدات له التتابع: CCGCGG. كان تتابعه التكميلي يحمل نفس هذا النمط؛ لأن خيطَي اللولب يصطفان مع توجُّه أحدهما في الاتجاه المعاكس للآخر. وقد جمَّع فون كيدروفسكي هذا المكمل من قطعتين؛ كلٌّ منهما من ثلاثة نيوكليوتيدات، تم تنشيطها أيضًا للمساعدة على الارتباط (شكل ٧-١).

أخطاء ومهملات

في مرحلةٍ ما أثناء نشر هذا الكتاب، سأتلقى من الناشرين بروفات طباعية للصفحات، وهي نسخ تقريبية من الصفحات النهائية، تم إعدادها من المخطوطة التي قدمتها. وهذه ستكون (كما آمل) نسخة أمينة لما كتبته تقريبًا. ولكن بلا شك — تقريبًا أيضًا — ستكون ثمة أخطاء صغيرة منثورة هنا وهناك بسبب الأخطاء المطبعية أو مشكلات قراءة الملفات بالكمبيوتر، وهي أشياء لا تثير دهشة أي كاتب؛ فلا مفر — عند نَسْخ رسالة طويلة ومعقدة — من حدوث أخطاء قليلة.

نفس الشيء يصدق على عمليات النسخ الجيني (حيث يجري نسخ الدِّي إن إيه إلى آر إن إيه)، والترجمة الجينية (حيث يجري نسخ الآر إن إيه إلى تتابع بروتيني). في بعض الأحيان يحدث إدخال نيوكليوتيد أو حمض أميني خطأً في السلسلة؛ ذلك لأن الجزيئات



شكل ٧-١: التضاعف الجزيئي لحمض نووي مكوَّن من ست وحدات.

ليست قادرة على التعرف التام طوال الوقت. ومن المرجح أن حوالي واحد من كل عشرين بروتينًا تقريبًا يتم صنعه بشكل غير صحيح.

هل هذا يعنينا في شيء؟ بصفة عامة: لا؛ فسيكون موقفًا غير عادي، بيني وبين الناشر، لو رصدنا كل الأخطاء المطبعية الأولية في هذا الكتاب قبل أن يذهب إلى المطبعة في المرحلة النهائية. ولكن — كما آمل — لن يكون أيٌّ منها خطيرًا لدرجة تمنعك من فهم ما أعنيه. وبالمثل، في حالة البروتينات يكون أغلب السلسلة كالسقالات التي تُمسك البقايا القليلة من الأحماض الأمينية في أماكنها، تلك البقايا التي تنجز مهمة البروتين التحفيزية. والأخطاء التي تحدث هنا وهناك في السقالات قد لا تكون خطيرة، وأحيانًا ما تكون عاقبةُ خطأٍ ما جزيئًا لا يؤدي وظائفه كلية. ولكن لأن الخلية لا تصنع جزيئًا إنزيميًّا واحدًا فقط، بل العشرات أو المئات من الجزيئات الإنزيمية بشكل مميز لأي مهمة معينة، فلا بأس إذن من حدوث هفوة أو اثنتين.

أنا هنا أتكلم عن الأخطاء «العشوائية»، ولكن الأكثر خطورة منها بكثير هي الأخطاء «النظامية»، التي تنشأ عند منبع المعلومات البيولوجية، على مقربة من المستودع الأساسي للمعلومات؛ فقد يؤدي وجود جزيء آر إن إيه تم نسخه بشكل خاطئ إلى تكوين مئات من البروتينات المعيبة؛ ولذلك، فهناك إنزيمات تراقِب عملية النسخ بعناية فائقة تحسُّبًا لوقوع أخطاء؛ مما يقلل معدل حدوثها إلى حوالي واحد في كل عشرة آلاف.

وحتى أخطاء النسخ قلما يكون لها تبعات خطيرة، فعلى أي حال، جزيئات الآر إن إيه سريعة الزوال وتستطيع الخلية صنع المزيد منها دائمًا. ولكن وجود خطأ

في الدِّي إن إيه يمكن أن يسبب ضررًا بحق؛ إذ لا توجد وسيلة لتصحيحه إذا وقع بالفعل. فوجود نيوكليوتيد واحد في غير موضعه الصحيح في أحد الجينات يعني أن كل جزيئات الآر إن إيه التي صُنعت من هذا الجين، وكل البروتينات التي صُنعت من جزيئات الآر إن إيه تلك؛ ستحتوي على العيب المناظر. وأسوأ من هذا أن كل خلية نشأت أصلًا من انقسام الخلية المعيبة جينيًّا ترث نفس النقيصة. وإذا وقع الخلل الجيني في أحد الأمشاج — أي خلية حيوان منوي أو بويضة — فإنه ينتقل إلى النسل المشتق من هذا المشيج؛ ولهذا السبب تخضع عملية تضاعُف الدِّي إن إيه لتدقيق بالغ الحرص من جانب إنزيمات «التصحيح الطباعي»، التي لا تسمح لأكثر من خطأ واحد في مليار قاعدة أن يتسلل إليها. ومن دون المصححين المطبعيين الجزيئيين هؤلاء، ربما اكتسبنا حوالي ١٠٠٠ جين معيب في كل خلية جديدة.

تلك الأخطاء الموروثة، وهي نتاج لأخطاء لحقت بعملية تضاعُف الدِّي إن إيه أثناء إنتاج الأمشاج، تُعرف باسم «الطفرات»، وبمجرد أن تحدث فإنها تُمرَّر من أحد الأبوين أو كليهما إلى ذريتهما على طول الشجرة الجينية. وهذه التحولات مسئولة عن الاضطرابات ذات الصلة بالجينات مثل التليُّف الحويصلي، فضلًا عن القابلية الجينية للإصابة بحالات مثل السرطان وأمراض القلب. ولكن على الرغم من تلك التبعات الفظيعة، فإن الطفرات هي توابل الحياة، وفي الحقيقة إننا نعزو إليها وجودنا ذاته. فلو كانت الكائنات البدائية الوحيدة الخلية، التي كانت تتضاعف في الحساء البدائي في مرحلة مبكرة من كوكب الأرض، لم تُصَب ببعض الطفرات بين الفينة والفينة، ولو كانت تستنسخ ما لديها من دي إن إيه في جميع الأحوال دون خطأ واحد؛ فما كان ليحدث تطور، ولا نشوء للحياة المعقدة.

من المؤكد أن شيئًا ما حدث لنص كتابي بعد عودة البروفات من الناشرين؛ فكثيرًا ما يحدث أن تكون هناك كلمات لم أكتبها، وهي ليست أخطاءً ولكنها تكمل المعنى. ستكون ثمة تغييرات قام بها المحرر، وأنا موقن أنها تجعل النص أسهل كثيرًا في قراءته وفهمه من النص الأصلي الذي كتبته.

وقد كان من قبيل المفاجأة ما حدث في منتصف سبعينيات القرن الماضي؛ إذ وجدوا أن الجينات أيضًا تحتاج إلى عمل تحريري كالكتب، وأن نسخة الآر إن إيه التي تنسلخ عن قالب الدِّي إن إيه لا تكون صالحة لأن تُترجم إلى بروتينات؛ إذ إنها تحتوي على كثير من المعلومات التي لا قيمة لها. وهذه «النسخ الأولية» من الآر إن إيه تشبه إلى حد ما

جملًا بها قطع من جمل أخرى أُقحمت على ما يبدو بشكل عشوائي، وتحتاج جزيئات الآر إن إيه إلى إجراء تحريري مكثف قبل أن تقدم رسالة واضحة تصلح للترجمة.

تلك المُقحَمَات العديمة الجدوى تسمى «إنترونات»، وأحيانًا ما تشكل جزءًا كبيرًا من الجين، كما أنها تعرف أيضًا بالتتابعات غير المشفِّرة؛ حيث إنها لا تشفِّر أجزاءَ البروتينات. وتقوم الإنزيمات بفَصْل الإنترونات من نسخة الآر إن إيه الأولية، ووَصْل نهايتَي مناطق التشفير (التي تسمى «إكسونات»).

هذه مجرد واحدة من الطرق التي يكون فيها «كتاب الخلية» المفترض في أغلبه غثاءً مشوشًا، أو تكرارًا مملًّا. ويُعتقد أن حوالي ٢ إلى ٣ بالمائة فقط من الجينوم البشري بكامله مشفِّر للبروتينات. بعض التتابعات تتكرر لسبب منطقي، فكل كروموسوم بشري ينتهي بالتتابع TTAGGG مُكررًا حوالي ٢٥٠٠٠ مرة، وهذه الأجزاء التي تسمى القطع النهائية «التيلوميرات» يُعتقد أنها تُبقي الكروموسومات في حالة ثبات. وهي تزداد قصرًا كلما انقسمت الخلية، ويسهم تآكلها مع مرور الزمن في حدوث عملية الشيخوخة. ولكن الكثير من التتابعات المتكررة الأخرى لا تؤدي وظيفة مفيدة. هناك مثلًا الينقولات، أو «الجينات القافزة»، وهي تتابعات متكررة تقفز هنا وهناك في الجينوم، تاركة نسخًا أينما ذهبت، ويُعتقد أنها طفيليات جينية تعيش في صميم لب كياننا، وهدفها الوحيد أن تضاعف أنفسها، وربما تكون الإنترونات بقايا من ينقولات عتيقة فقدت قدرتها على التنقل.

إن الآلة البروتينية العاملة على تقطيع الأحماض النووية ووَصْلها ومضاعفتها وتخليقها تقدِّم الأدوات الأساسية اللازمة للتكنولوجيا الحيوية الجينية، المتمثلة في المعالجة المباشرة للجينومات؛ فإنزيمات التقصير، على سبيل المثال، هي بروتينات يمكنها التعرف على تتابع قصير معين من الدِّي إن إيه وقَطْع السلسلة عند نقطة معينة. وإنزيمات الليجاز تربط النهايات السائبة للدِّي إن إيه معًا. ويمكن مضاعفة أجزاء من الدِّي إن إيه بصفة مستمرة، في أنبوبة اختبار باستخدام إنزيمات بوليميراز الدِّي إن إيه، فيجري فصل الخيطين المزدوجين بالتسخين، مع تعريضهما للتضاعف المقولب، وتؤدي الدورات المتكررة من التضاعف والتسخين إلى إكثار الدِّي إن إيه بشكل متوالٍ. وهذه العملية، التي تسمى تفاعل البوليميراز المتسلسل، تَستخدم بوليميراز دي إن إيه مأخوذ من نوع من البكتيريا يعيش في الينابيع الحارة. ولقد تطورت إنزيمات هذه البكتيريا لتتحمل درجات الحرارة العالية؛ ومن ثم لا يتلف بوليميراز الدِّي إن إيه بتأثير دورات التسخين.

تتيح هذه الأدوات للعلماء أن يعيدوا «تأليف الكتاب»، بإدخال جينات جديدة في جينوم كائن ما. إن علماء المحاصيل الزراعية مهتمون باستحداث نباتات لها جينات تضفي عليها مقاومة للآفات، أو للقحط أو لبعض مبيدات الأعشاب، فضلًا عن إدخال جينات تحسن نكهة المحصول، أو معدل نموه أو غير ذلك. وهناك خطر محتمل أن تنتقل الجينات التي تحث على مقاومة مبيدات الأعشاب — على سبيل المثال — من المحاصيل الزراعية إلى الأعشاب الضارة؛ مما يولد أجيالًا جديدة من الأعشاب القوية الشرهة، ولا يَعرف العلماء بعدُ درجةَ احتمالية حدوث هذا الانتقال الجيني «الأفقي» بين أنواع الكائنات.

يعترض بعض الناس على الهندسة الوراثية على اعتبار أن من الخطأ أخلاقيًّا أن نتلاعب بالمادة الأساسية للحياة — الدِّي إن إيه — سواء أكانت في البكتيريا أم البشر أم الغنم أم الثمار. يمكن أن يتفهم المرء هذه الاعتراضات، وسيكون من العجرفة أن ننبذها باعتبارها غير علمية، ومع ذلك فإنها لا تتفق مع ما تَكشَّف لنا الآن عن الأساس الجزيئي للحياة؛ فتلك الفكرة القائلة بأن بنيتنا الجينية شيء مقدس يبدو من الصعب تأييدها بمجرد أن نرى كيف أن هذه البنية عارضة، إن لم تكن عشوائية. إن أغلب جينوماتنا البشرية نفايات تحفل بالطفيليات، ومليئة ببقايا ما يربو عن ثلاثة مليارات عام من التطور. فلا يبقى على ما يبدو إلا القليل مما يثير الإعجاب أو يُعتبر رائعًا في هذه المكتبة الجينية الجامحة، بل إن الإعجاب يجب أن نبقيه لتلك الكتائب من البروتينات المثابرة التي لا تألو جهدًا في استخراج أدق المعاني من بين أكوام النفايات واللغو تلك. من المذهل بحق أن نرى تلك العمليات الجينية وهي تسير على نحو فعال، ولكنها مثل معظم ما يحدث في الحياة تعتبر حلولًا وسطًا وأشياء مؤقتة يقل فيها الاهتمام بالجودة.

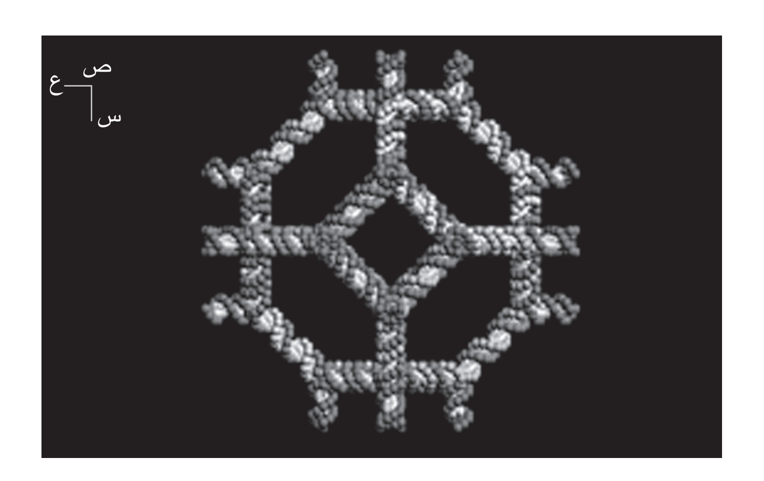
مخططات الإنشاءات

يعد الدِّي إن إيه مثالًا راقيًا «للمادة المزوَّدة بالمعلومات»؛ فهو مبرمج على أن يعمل بطريقة عالية التخصص على تجميع كل نيوكليوتيد يتزاوج مع مكمله على مدى آلاف من أزواج القواعد، ويمثل هذا النوع من التجميع الذاتي المبرمج أحد أهداف الكيمياء فوق الجزيئية. الذرات في حد ذاتها لا تُظهر الكثير من قدرات التمييز، ولكن عن طريق صنع الجزيئات وليست الذرات — التي هي الوحدات البنائية الأساسية — يصبح علماء

الكيمياء فوق الجزيئية قادرين على برمجة معلومات أكثر نفعًا وإرشادًا في صميم لَبِنَاتهم ومِلَاطِهم.

إلا أن الدِّي إن إيه يقدم ما هو أكثر من مخطط وجود للتجميع الذاتي المبرمج؛ إذ يمكنه أن يوفر البنية نفسها. فلماذا لا نستخدم مبادئ تزاوج القواعد التكميلي لضم سقالات الدِّي إن إيه لبناء تراكيب تكون أكثر تعقيدًا من اللوالب المزدوجة بالخلية؟

تم استكشاف هذا المفهوم على يد نادريان سيمان في جامعة نيويورك، وهو يوظف الجهاز الإنزيمي للتكنولوجيا الحيوية في تقطيع ووصل الدِّي إن إيه لتشكيل صروح عظيمة مثل الأشكال المتعددة السطوح الشبيهة بالأقفاص: كالمكعب ومُثَمَّن الأسطح المقطوع (شكل ٧-٢). تشكِّل لوالب الدِّي إن إيه المزدوجة حوافَّ هذه التراكيب، ولكن عند أركانها تتلاقى ثلاث لفات في وصلة ثلاثية، وهذه الوصلات تم حبكها ببراعة فائقة؛ إذ يتجه الخيطان التوءم في اتجاهين منفصلين على طول حافتين مختلفتين؛ حيث ينضفران مع خيوط جديدة. وقد صنع سيمان ومعاونوه تلك الوصلات بضم الدِّي إن إيه التخليقي مع تتابعات مخططة بعناية.



شكل ٧-٢: تركيبة جزيئية متعددة السطوح صُنعت من دي إن إيه مزدوج الخيوط.

تكمن الحيلة في تجميع الوصلات الثلاثية لتشكيل جسم جزيئي هندسي ثلاثي الأبعاد. يعطي سيمان الفروع «أطرافًا لزجة»؛ حيث يمتد أحد الخيطين متخطيًا الآخر،

وهنا تكون القواعد المكشوفة غير المزدوجة جاهزة للتزاوج مع تلك الموجودة على خيط آخر، ولكن هذا يحدث فقط إذا كان لديه تتابع تكميلي. وبهذه الطريقة تكون الأطراف لزجة بشكل انتقائي، ويمكن الجمع بين كل واحد منها وآخر، بحيث تكون التركيبة كلها مبرمجة لتبني نفسها من أجزائها المكوِّنة. وبمجرد أن تتزاوج الأطراف اللزجة مع شركائها بروابط هيدروجينية، قاعدة لقاعدة، تشكِّل إنزيمات الربط روابط قوية لدعم التركيبة الهيكلية.

في الوقت الحالي، تعد هذه الإنشاءات الجزيئية ضربًا من حماقات البراعة الفنية الفائقة واستعراضًا للعضلات واستظهارًا لقدرات السيطرة العجيبة التي يمكن أن تقدمها المعرفة الجزيئية في مجال العمارة على المقياس النانومتري. ولكن يفترض سيمان أن تراكيبه الهيكلية من الدِّي إن إيه قد تعمل كسقالات لتجميع جزيئات ومواد أخرى بطرق مفيدة؛ فعلى سبيل المثال، من الممكن كسوة خيوط الدِّي إن إيه بالفضة، مع تحويلها إلى أسلاك جزيئية موصلة كهربيًّا. ولعلنا يومًا ما نبني دوائر إلكترونية دقيقة بالبرمجة الجينية للأسلاك حتى تترابط في نمط معين.

فضلًا عن هذا فإن الأطراف اللزجة للدِّي إن إيه يمكن أن تمسك بإحكام أشياء على المقياس الجزيئي بطريقة انتقائية. وقد استخدم تشاد ميركين وزملاؤه في جامعة نورث وسترن في ولاية إيلينوي هذه الفكرة لتجميع دقائق صغيرة من الذهب في مجموعات. وحجم هذه الدقائق لا يتجاوز بضعة نانومترات، وتسمى بلورات النانو، ولكلٍّ منها «شارة» تتكون من دي إن إيه وحيد الخيط، ولكن لأن تتابعات هذه الشارة ليست تكميلية، فإن الرقائق تبقى منفصلة، وبإضافة خيوط دي إن إيه وحيدة يكمل طرفاها تتابعات الشارات، يصبح الباحثون قادرين على ربط دقائق النانو معًا. والمجموعات الناتجة تشتت الضوء الأزرق بقوة، لدرجة أن لون المحلول يتحول إلى لون النبيذ. ويقوم ميركين وزملاؤه الآن بتطوير هذه التقنية تجاريًّا كوسيلة للكشف البصري البسيط عن خيوط الدِّي إن إيه ذات التتابع المعين؛ وهو شيء يحتاجه العلماء كثيرًا في التحليل الجيني.

وعن طريق تجميع بلورات نانو من المعادن أو أشباه الموصلات لتكوين تشكيلات عضوية، يأمل بعض الباحثين أن يصيروا قادرين على بناء أجهزة إلكترونية أصغر بكثير من التي تُصنع حاليًّا بتقنيات التصنيع الدقيق التقليدية المستخدمة في صنع رقائق السليكون. يمكن أن تعمل بلورات النانو من أشباه الموصلات كعناصر تحفظ الذاكرة

لتخزين المعلومات الإلكترونية، وهي تتفاعل مع الضوء بطرق يمكن أن تكون مفيدة في صنع أجهزة لمعالجة المعلومات على أساس ضوئي. وقد تقدِّم عمليةُ برمجة تجميع بلورات النانو باستخدام عوامل ربط من الدِّي إن إيه طريقةً لترتيبها في أنماط من الدوائر الإلكترونية، وثمة احتمال آخر افترضته بحوث أنجيلا بلتشر في جامعة تكساس الأمريكية ومساعديها، الذين استخدموا خصائص التعرف الجزيئية للبروتينات بدلًا من الدِّي إن إيه. وقد استحدثوا جزيئات ببتيدية صغيرة يمكنها أن تتعرف على أسطح أنواع مختلفة من أشباه الموصلات والالتصاق بها، وبإمكان الببتيدات أن «تشعر» بطبيعة تكوين الذرات عند سطح بلورات أشباه الموصلات. قد تُستَخدم يومًا ما بروتينات حركية مهندسة وراثيًّا (انظر الفصل الخامس) لها أذرع ببتيدية يمكنها التعرف على أنواع معينة من أشباه الموصلات لكي تُجَمِّع بلورات النانو على موقع بناء جزيئي وترتبها في نمط دوراني.

المنطق الجزيئي

منذ اختراع الكمبيوتر في أربعينيات القرن العشرين تضاعفت القدرات الحاسوبية للأجهزة الجديدة تقريبًا بمعدل مرة كل ثمانية عشر شهرًا، وهذا الاتجاه — الذي يعرف بقانون مور على اسم جوردون مور، المؤسس المشارك لشركة إنتل، الذي كان أول من أشار إلى هذا الأمر في عام ١٩٦٥ — يتجه في مسار التصغير. تزداد قدرات الكمبيوتر كلما صار من الممكن تكديس المزيد من مكونات الدوائر الإلكترونية في حيز معين، ولكن إذا كان على قانون مور أن يصمد لخمسة وعشرين عامًا أخرى أو غير ذلك، فإن على الأجهزة الإلكترونية أن تنكمش إلى أحجام نانومترية؛ أي إلى المقياس الجزيئي.

لا يعرف أحد من العلماء كيف يمكن تحقيق ذلك، فبهذه المقاييس يصير الترانزستور السليكوني — الذي هو الأساس العامل للدوائر المتكاملة — غير صالح لأداء المهمة. ولكي نستمر في صنع كمبيوترات أسرع وأقوى، فهناك مدرسة فكرية متنامية تقول إن مكونات تلك الأجهزة سيتعين أن تكون من جزيئات مفردة، وهذه وجهة نظر تختلف تمامًا عن تكنولوجيا المعلومات التقليدية لن يستثمر فيها إلا المغامرون المتهورون.

إلا أنها ليست فكرة جديدة؛ ففي عام ١٩٧٤ تَقدَّم الكيميائيان الأمريكيان مارك راتنر وآرى أفيرام بتصميم لمقوِّم للتيار أحادي الجزيء (وهو جهاز يمرر التيار الكهربي في اتجاه واحد فقط). وبعد هذا ببضع سنوات اكتُشفت بوليمرات لها أساس كربوني

يمكنها أن توصل الكهرباء، وبدأ الباحثون يأملون في أن توفر الجزيئات المفردة من هذه المواد الأرضية لإنتاج كمبيوتر جزيئي. وهكذا ولد حقل «الإلكترونيات الجزيئية».

ولكن على مدار العقد التالي لم يتحقق الكثير؛ فقد كانت فكرة بروت سابقة على أوانها، وتفتقر لأي وسائل تجريبية لتخليق أنواع الأجهزة الجزيئية التي حلم بها العلماء أو تجهيزها أو سبر غورها. وفي السنوات الأخيرة تلاقت سبل عديدة لخلق نهضة جديدة في هذا الحقل، وأخيرًا بدأ مجال الإلكترونيات الجزيئية — وتابعه الحوسبة الجزيئية — في أن يحظى باهتمام بالغ من الأشخاص المهتمين بهذا الشأن، والشركات المنتجة لأجهزة الكمبيوتر.

من المكونات الأساسية لتكنولوجيا معالجة المعلومات الجزيئية المُحوِّل؛ وهو جهاز الهدف منه أن يَخْلُف الترانزستور. ونقول بأكثر الألفاظ بدائية إن المحول يمكن أن يوجد في حالتين ثابتتين مختلفتين: هما وضْعا «التشغيل» و«الإيقاف». يمرر الترانزستور التيار عند وضع التشغيل ويوقفه عند وضع الإيقاف، ولكن المحول يكون مفيدًا لمعالجة المعلومات فقط إذا أمكن توصيله بأجهزة أخرى، حتى تستطيع الأجهزة أن تتحدث فيما بينها وأن تمرر المعلومات بينها جيئة وذهابًا. وهذا يصعب تحقيقه في حالة الجزيئات.

ومع ذلك فقد أُعلن عن شيء من هذا القبيل في عام ١٩٩٩ من جانب جيمس هيث ومساعديه في جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس بالتعاون مع علماء من شركة عملاقة من شركات الكمبيوتر هي هيوليت باكارد؛ إذ قاموا بوصل محولات أساسها جزيء عضوي لإنتاج بوابة منطقية يتم التحكم بها كهربيًّا.

في دوائر الكمبيوتر يجري تشفير المعلومات في صورة ثنائية كسلسلة من رقمَي ١ وصفر، بحيث تكون الإشارة «١» مقابلة لنبضة كهربائية بفولطية معينة، بينما تكون الإشارة «صفر» مقابلة لعدم وجود فولطية. هاتان هما الإشارتان الوحيدتان اللتان تُرسَلان خلال الدائرة، فلا توجد إشارات مقدارها نصف أو اثنان. ويتم تشفير البيانات في تتابع من الآحاد والأصفار، تمامًا كما أن الدِّي إن إيه يشفِّر المعلومات في تتابع من القواعد النيوكليوتيدية. إلا أن الشفرة الثنائية أبسط من الشفرة الجينية؛ إذ إن لها حرفين اثنين فقط، وكل وحدة من المعلومات في الإشارة المشفرة — أي كل ١ أو صفر — يطلق عليها اسم «رقم ثنائي» أو «بِت».

تتعامل أجهزة الكمبيوتر مع المعلومات الثنائية، وتُجري عمليات حسابية باستخدام البوابات المنطقية؛ وهي أجهزة أو دوائر تتخذ قرارات. وتتلقى البوابة المنطقية إشارة

واحدة أو أكثر من إشارات المُدْخَل وتطلق واحدة أو أكثر من إشارات المُخْرَج. تعتمد المُخرجات على ما تقوله المُدخَلات، فبوابة «إيه إن دي» على سبيل المثال، تتلقى اثنتين من «بِتات» المدخل وتُصْدِر مُخرجًا واحدًا. ولو كان كلا المُدخلين ١ يكون المخرج ١ كذلك، ولكن أي مجموعة أخرى من المدخلات تنتج المخرج صفر. يمكن أن تُجري توليفات بسيطة كهذه من البوابات المنطقية عمليات حسابية؛ مثل قراءة رقمين مشفرين في صورة ثنائية وإنتاج مخرج يشفر حاصل جمعهما (بالإضافة) أو حاصل طرحهما (أي الفارق بينهما).

وقد أنشأ هيث ورفاقه بوابات «إيه إن دي» من محول جزيئي يسمى روتاكسان، وهو تجميع من جزيئين اثنين، على شكل حلقة ملتفة حول قضيب. تُمنع الحلقة من الانفلات بواسطة وحدات غطاء كبيرة مثبتة بطرفي القضيب. وقد صمِّم القضيب على أن يجذب الحلقة، بحيث يتشابك الجزيئان تلقائيًّا عند مزجهما معًا، وتضاف الأغطية الطرفية فيما بعد. استحدث فريزر ستودارت — زميل هيث — من جامعة كاليفورنيا، بلوس أنجلوس تقنيات لصنع تجميعات جزيئية كهذه حين كان يعمل في جامعة شيفيلد بإنجلترا في أواخر ثمانينيات القرن الماضي.

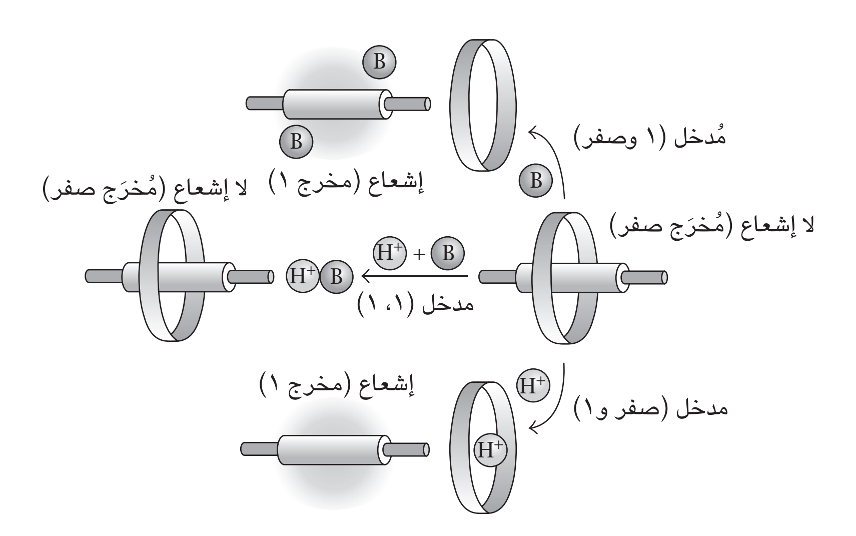
رتب الباحثون جزيئات الروتاكسان في شكل طبقة على قطب كهربي وقاموا بترسيب أسلاك معدنية دقيقة فوقه، وعن طريق تعريض الأسلاك لفولطية كهربية أمكن تحويل الجزيئات من قابلية التوصيل الكهربي المنخفضة إلى قابلية التوصيل المرتفعة. وقد شكلت آلاف كثيرة من الجزيئات، الملتصقة بسلك واحد، محولًا واحدًا، وأوصل الباحثون العديد من تلك المحولات معًا لصنع بوابة «إيه إن دي».

وقد صرَّح الباحثون قائلين إنه من حيث المبدأ، من المفترض أن يكون بالإمكان بناء كل جهاز من مجرد جزيء واحد قابل للتحويل. ولكن من الصعب أن نصنع وصلات كهربائية نوصلها بجزيئات مفردة، وأن نقيس تيارات كهربائية دقيقة تمر خلال تلك الجزيئات. ولكن حتى هذا الأمر ليس مستحيلًا؛ فقد تمكن مارك ريد وجيمس تور ومساعدوهما في الولايات المتحدة من قياس درجة التوصيل الكهربائي «لسلك جزيئي» مفرد عن طريق توصيل قطبين من الذهب.

وقد عرض فريزر ستودارت، بالتعاون مع فينشنزو بلزاني، ومساعدوهما بمدينة بولونيا الإيطالية، عملية منطقية مختلفة تسمى «إكس أُو آر» في بوابة من جزيء مفرد. وبوابة «إكس أُو آر» تشبه بوابة «إيه إن دي» لها مُدخلان اثنان ومُخرج واحد، وتكون

إشارة المخرج «١» إذا كان المدخلان مختلفين (١ وصفر أو صفر و١) وتكون صفرًا إذا كانا متماثلين (صفر وصفر أو ١ و١). وقد لاحظ الباحثون هذا السلوك في الروتاكسان الكاذب؛ وهو تجميع جزيئي من حلقة وقضيب مع عدم وجود سدادات طرفية، وبهذا يمكن أن تنسل الحلقة من القضيب.

وبدلًا من استخدام الإشارات الكهربائية، تلقى الجهاز مُدخلات كيميائية وأصدر مُخرجًا بصريًّا؛ بمعنى أنه غيَّر سلوكه المطلق للضوء (أي الإشعاع الفلوريسي)، وذلك اعتمادًا على كون «الإشارتين الكيميائيتين» في وضع «التشغيل» أو «الإيقاف»؛ أي سواء كانت المادتان الكيميائيتان موجودتين أم لا (شكل ٧-٣). هذا يشبه الطريقة التي تعمل بها البروتينات المستقبِلة عند سطح الخلية (انظر الفصل السادس)، فهي ترسل نوعًا من الإشارات اعتمادًا على ما إذا كانت قد ربطت جزيئاتها المستهدفة أم لا.



شكل ٧-٣: بوابة منطقية جزيئية يشكلها تجميع جزيئي، يشبه الإبرة والفتلة، يسمى «روتاكسان».

وباستخدام مبادئ مشابهة تمكن إيه برازانا دي سيلفا وناثان ماكليناجان في جامعة بلفاست بأيرلندا الشمالية من ضم بوابتين منطقيتين جزيئيتين بطريقة تسمح

لهما بإجراء عمليات حسابية أولية؛ بمعنًى آخر أنهما صارا قادرَين على استخدام الجزيئات في العد وإجراء عمليات جمع بسيطة مثل ١ + ١ = ٢.

بطبيعة الحال، الطريق من جمع واحد زائد واحد حتى الوصول إلى صنع جهاز كمبيوتر يمكن مقارنته بالأجهزة السليكونية هو طريق طويل، ولكن دراسات كهذه تُظهر مبدءًا مهمًّا؛ وهو أن الجزيئات يمكن أن تُستخدم في الحوسبة، وعلى مستوى جهاز لكل جزيء. وأخيرًا بدأ الكمبيوتر الجزيئي يبدو كأكثر من مجرد إعلان جذاب.

كلما نظرنا عن كثب أكثر لهذه الفكرة، أمكننا أن نرى المزيد من أوجه تشابه مع التحديات التي يواجهها جسم الإنسان؛ مثل كيفية ترتيب الجزيئات حيث نريد، وكيفية نقل الإشارات وتكبيرها، وكيفية إنماء أسلاك بين محولين (مثل العصبونات)، وكيفية التغلب على الأخطاء، وكيفية التحكم في عملية التوقيت النسبي للأحداث. وقد يحتاج مهندسو الكمبيوتر في المستقبل لمعرفة الكثير عن علم الأحياء.

حوسبة الدِّي إن إيه

وتأكيدًا على هذه النقطة الأخيرة، في السنوات الأخيرة أَوْضَحَ بعض العلماء أن الحوسبة يمكن تحقيقها باستخدام الدِّي إن إيه. وهذا يعود بنا إلى النقطة التي بدأنا بها؛ إذ إنني بدأت باقتراح أن الدِّي إن إيه مثال واقعي للحوسبة الجزيئية، ولكنه في الخلية يقدم البرنامج اللازم لصنع البروتينات. وقبل أن يتقدم ليونارد أدلمان بافتراضه في عام ١٩٩٤، لم يحلم بَشَرٌ بأن الدِّي إن إيه يمكن استعماله في حل نفس نوع المسائل التي تحلها أجهزة الكمبيوتر. لقد أدرك أدلمان أن الشفرة الجينية يمكن استعمالها — تمامًا مثل الشفرة الثنائية لعلوم الكمبيوتر — في تشفير المشكلات والمسائل الحسابية والتعامل معها. وأظهر أن تقنيات التكنولوجيا الحيوية المتعلقة بمعالجة الدِّي إن إيه وإعادة ترتيبه، يمكن استخدامها في إنتاج كل الحلول الممكنة لهذه المشكلة، وكلٌّ منها كامن ومُشفَّر في جزيء من الدِّي إن إيه. وبعد ذلك يمكن توظيف تقنيات تحليل تتابعات الدِّي إن إيه من أجل فحص جميع هذه الحلول الممكنة وتحديد السليم منها.

فيما يتعلق بأنواع معينة من المشكلات الحسابية لا تمتلك أجهزة الكمبيوتر طرقًا مختصرة للإجابات الصحيحة، بل يتعين عليها فحسب أن تختبر كل الخيارات، وتنتقي أفضلها. وإذا كان عدد الإجابات الممكنة كبيرًا، يمكن أن يستغرق هذا البحث وقتًا طويلًا جدًّا. تعتبر تلك المشكلات من أصعب ما يمكن حله باستخدام أجهزة الكمبيوتر التقليدية،

ومن الأمثلة الكلاسيكية، مشكلة «الملاح المسافر»، التي تستلزم تحديد أقصر طريق يربط بين عدد كبير من النقاط في الفراغ (وهي «المدن») بحيث تتم زيارة كل مدينة مرة واحدة فحسب.

وقد أظهر أدلمان أنه عن طريق خلط ووصل قطع صغيرة من الدِّي إن إيه عشوائيًّا يمكن تشفير وإنتاج كل الحلول لهذه المشكلات في أنبوبة اختبار من جزيئات الدِّي إن إيه الوحيدة الخيط. قد يكون عدد هذه الحلول هائلًا، إلا أن عدد الجزيئات في أنبوبة الاختبار لا يزال أكبر. ولأن كل الإجابات الممكنة يتم إنتاجها واختبارها فورًا، بدلًا من التعامل معها كلٍّ على حدة، تستطيع عملية حوسبة الدِّي إن إيه من حيث المبدأ أن تتوصل سريعًا إلى الحل «الأفضل».

وسواء أَثْبَت أن حوسبة الدِّي إن إيه مفيدة من الناحية العملية أم لا، فإن لها جاذبية مجازية قوية؛ إذ إنها تعيد إلى الأذهان الرسالة القائلة إن الأساس الجزيئي للحياة كامن في معالجة المعلومات. كثيرًا ما يقال إن كل عصر يميل إلى تفسير العالم من خلال نماذج مشتقة من تكنولوجيته الأكثر تقدمًا؛ ومن ثم فربما في عصر المعلومات يجب علينا أن نكون حذرين من التمسك الأعمى بمثل تلك الإجابة (الجزئية) عن ذلك السؤال المتكرر الذي شغل بال هالدين وشرودنجر وكثيرين غيرهم. ولعل ما هو أكثر أهمية أن نعتبر هذا إظهارًا للعالم التفاعلي الدِّيناميكي المذهل الذي تسكنه الجزيئات التي لا نراها أو ندرك وجودها في الغالب.

هوامش

(١) لا بد أن أشير في هذا المقام إلى أنني أقدمت هنا على واحد من التبسيطات الكثيرة الضرورية عند شرح علم الجينات؛ فلقد رأينا أن بعضًا من أكثر أجزاء البروتينات أهمية، مثل وحدة الهيم التي في الهيموجلوبين، لا يتكون من أحماض أمينية، وإنما من مجموعات كيميائية أخرى، وهذه المجموعات التي تسمى المجموعات «الترقيعية» أو التكميلية تضاف إلى السلسلة البروتينية بعد تصنيعها، وتضطلع بصنعها إنزيمات أخرى. وأما البروتين العاري، أيْ من دون مجموعات تكميلية، فيسمى البروتين الصميم «الأبوبروتين»، وهو بصفة عامة يكون عديم النفع ما لم تُضَف إليه «الكماليات» اللازمة.

ولكي تستنتج بنية بروتينٍ ما وشكله يجب ألا نكتفي بمعرفة تتابع أحماضه الأمينية؛ ومن ثم تتابُع الجينات التي تشفره، ولكن يجب أيضًا معرفة هوية ووظائف البروتينات التي تشتغل، فيما بعدَ الولادة، على «البروتين الصميم» وتؤثِّر فيه.

ملاحظات

الفصل الأول: صُنع الجزيئات: تلك الأشياء الخفية

'The sergeant beckoned the waitress'. F. O'Brien, *The Dalkey Archive* (Normal, Ill.: Dalkey Archive Press, 1993), 80.

'Did you ever study the Mollycule Theory'. Ibid. 81.

'Mollycules is a very intricate theorem'. Ibid. 81–2.

Primo Levi's famous book is *The Periodic Table* (London: Abacus, 1986).

The quotations in the box are from ibid. 3, 58, 171; the translation is copyright Shocken Books Inc. (1975).

John Horgan's book is *The End of Science* (London: Little, Brown & Co., 1997).

The several other recent books I refer to include the (otherwise excellent) M. Kaku, *Visions* (New York: Doubleday, 1997), and J. Maddox, *What Remains to be Discovered* (London: Macmillan, 1998).

Roald Hoffmann's book is *The Same and Not the Same* (New York: Columbia University Press, 1995).

‘a “low” chemistry, almost culinary’. P. Levi and T. Regge, *Conversations* (London: I. B. Tauris & Co., 1989).

Thomas Pynchon, *Gravity’s Rainbow* (London: Penguin, 1987).

The quotation in the box is from ibid. 249–50.

My book is *H_2O: A Biography of Water* (London: Weidenfeld & Nicolson, 1999).

‘the profession I studied in school’. P. Levi, *The Monkey’s Wrench* (London: Penguin, 1987), 142–3.

Primo Levi ‘put it this way’ in ibid. 144.

For the story of the aniline dye industry, see A. S. Travis, *The Rainbow Makers* (Bethlehem, Pa.: Lehigh University Press, 1993), and S. Garfield, *Mauve* (London: Faber & Faber, 2000).

‘as you can imagine’. Levi, *The Monkey’s Wrench,* 144.

The papers reporting the synthesis of taxol are K. C. Nicolaou *et al.*, ‘Total Synthesis of Taxol’, *Nature,* 367 (1994), 630; R. A. Holton *et al.*, ‘First Total Synthesis of Taxol. 1: Functionalization of the B Ring’, *Journal of the American Chemical Society,* 116 (1994), 1597; R. A. Holton et al., ‘First Total Synthesis of Taxol. 2: Completion of the C and D Rings’, *Journal of the American Chemical Society,* 116 (1994), 1599.

Müller’s group describe their ‘big wheels’ in A. Müller *et al.*, ‘Formation of a Ring–Shaped Reduced “Metal Oxide” with the Simple Composition $[(MoO_3)_{176}(H_2O)_{80}H_{32}]$’, *Angewandte Chemie International Edition,* 37 (1988), 1220.

الفصل الثاني: العلامات الحيوية: جزيئات الحياة

‘I am not going to answer this question’. J. B. S. Haldane, *What Is Life?* (Welwyn: Alcuin Press, 1949), 58.

‘Nature is what we know’. Emily Dickinson (c.1863), *The Complete Poems,* ed. T. H. Johnson (London: Faber & Faber, 1975), 332.

‘life is a pattern of chemical processes’. Haldane, *What Is Life?,* 61–2.

‘the cause of most phenomena’. J. J. Berzelius (1812), *Ofversigt af djurkemiens framsteg och narvarande tillstånd: A Report to the Swedish Academy of Science, Presented on 13 August 1810,* translated into English by G. Brunnmark as *A View of the Progress and Present State of Animal Chemistry* (London, 1818), 4–8.

‘This *power to live*’. Ibid.

Allan Wilson’s group reported their findings in R. L. Cann, M. Stoneking, and A. C. Wilson, ‘Mitochondrial DNA and Human Evolution’, *Nature,* 325 (1987)/31. This article was much criticized on methodological grounds: see H. Gee, *Nature,* 355 (1992), 583.

‘Advances in directed evolution’. J. W. Szostak, D. P. Bartel, and P. L. Luisi, ‘Synthesizing Life’, *Nature,* 409 (2001), 387.

الفصل الثالث: المهمة الشاقة: صنع مواد من جزيئات

Space tethers are described in R. L. Forward and R. P. Hoyt, ‘Space Tethers’, *Scientific American,* 280/2 (February 1999), 86. For the broader picture on molecular materials, see P. Ball, *Made to Measure: New Materials for the 21st Century* (Princeton: Princeton University Press, 1997).

The many varieties of spider silk are discussed in F. Vollrath, ‘Spider Webs and Silks’, *Scientific American* (March 1992), 70.

Making materials from artificial genes is described in D. A. Tirrell, M. J. Fournier, and T. L. Mason, ‘Genetic Engineering of Polymeric Materials’, *MRS Bulletin* (July 1991), 23.

The discovery of carbon nanotubes was reported in S. Iijima, 'Helical Microtubules of Graphitic Carbon', *Nature,* 354 (1991), 56.

For the story of the discovery of the fullerenes, see J. Baggott, *Perfect Symmetry* (Oxford: Oxford University Press, 1994).

The tentative step towards the production of nanotube fibres is described in B. Vigolo *et al.*, 'Macroscopic Fibers and Ribbons of Oriented Carbon Nanotubes', *Science,* 290 (2000), 1331.

الفصل الرابع: في مسألة الأيض: الجزيئات والطاقة

The Second Law of Thermodynamics is discussed in depth in P. W. Atkins, *The Second Law* (New York: W. H. Freeman & Co., 1984).

Erwin Schrödinger, *What Is Life?* (Cambridge: Cambridge University Press, 1944).

The work on artificial mimics of photosynthesis is described in G. Steinberg-Yfrach *et al.*, 'Conversion of Light Energy to Proton Potential in Liposomes by Artificial Photosynthetic Reaction Centres', *Nature,* 385 (1997), 239; G. Steinberg-Yfrach *et al.*, 'Light-Driven Production of ATP Catalysed by F_0F_1-ATP Synthase in an Artificial Photosynthetic Membrane', *Nature,* 392 (1998), 479.

'$CH_3C_6H_2(NO_2)_3$ + $Hg(CNO)_2$'. A. Huxley, *Brave New World* (London: Granada, 1977), 48.

The synthesis of explosive octanitrocubane is described in M.-X. Zhang, P. E. Eaton, and R. Gilardi, 'Hepta- and Octanitrocubanes', *Angewandte Chemie International Edition,* 39 (2000), 401.

الفصل الخامس: المحركات الدقيقة المفيدة: المحركات الجزيئية

Richard Feynman's article 'There's Plenty of Room at the Bottom' appeared in *Engineering and Science magazine* (February 1960). More accessible versions are available in B. C. Crandall and J. Lewis (eds.), *Nanotechnology: Research and Perspectives* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1992), or at http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html.

'we don't have those tweezers'. P. Levi, *The Monkey's Wrench* (London: Penguin, 1987), 144.

I wish I could point to a good general reference source for nanotechnology, but that is surprisingly difficult. K. Eric Drexler has done most to popularize the subject, albeit in a manner that owes as much to science fiction as to current science—see his *Engines of Creation* (London: Fourth Estate, 1990), and also K. E. Drexler, C. Peterson, and G. Pergamit (1994), *Unbounding the Future* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1994). And, for critical comment on Drexler's vision of nanotechnology, see G. Stix, 'Trends in Nanotechnology: Waiting for Breakthroughs', *Scientific American* (April 1996), 94; and D. E. H. Jones, 'Technical Boundless Optimism', *Nature,* 374 (1995), 835. Ed Regis's *Nano!* (New York: Bantam Books, 1995), is a readable account, but centres around Drexler's vision. The volume by Crandall and Lewis (above) has some nice contributions, if slightly technical and now outdated. Michael Gross's *Travels to the Nanoworld* (New York: Plenum, 1999), is well worth reading but sometimes idiosyncratic in its choices. The web site of Drexler's Foresight Institute (http://www.foresight.org) does a good job of collating up-to-date popular and technical articles.

The work of Kinosita's group is described in Y. Arai *et al.*, 'Tying a Molecular Knot with Optical Tweezers', *Nature,* 399 (1999), 446.

The artificial molecular motor is described in N. Koumura, R. W. J. Zijlstra, R. A. van Delden, N. Harada, and B. L. Feringa, 'Light-Driven Monodirectional Molecular Motor', *Nature,* 401 (1999), 152.

Ross Kelly's rotary motor is described in T. R. Kelly, H. De Silva, and R. A. Silva, 'Unidirectional Rotary Motion in a Molecular System', *Nature,* 401 (1999), 150.

The field of synthetic molecular motors and machines is reviewed in V. Balzani, A. Credi, F. M. Raymo, and J. F. Stoddart, 'Artificial Molecular Machines', *Angewandte Chemie International Edition,* 39 (2000), 3348–91.

The work of Stan Leibler's group is described in F. J. Nédélec, T. Surrey, A. C. Maggs, and S. Leibler, 'Self-Organization of Microtubules and Motors', *Nature,* 389 (1997), 305.

Viola Vogel and colleagues reported their work in J. Dennis, J. Howard, and V. Vogel, 'Molecular Shuttles: Directed Motion of Microtubules along Nanoscale Kinesin Tracks', *Nanotechnology,* 10 (1999), 232.

The ATP synthase rotors made by Carlo Montemagno and colleagues are described in R. K. Soong *et al.*, 'Powering an Inorganic Nanodevice with a Biomolecular Motor', *Science,* 290 (2000), 1555–8.

الفصل السادس: توصيل الرسائل: الاتصالات الجزيئية

The endocrine system and other systems of biomolecular communication are discussed in S. Aldridge, *Magic Molecules: How Drugs Work* (Cambridge: Cambridge University Press, 1998).

For an excellent discussion of neurotoxins and mind-altering drugs, see J. Mann, *Murder, Magic, and Medicine* (Oxford: Oxford University Press, 1992).

For an overview of supramolecular chemistry, see J.-M. Lehn, *Supramolecular Chemistry* (Weinheim: VCH, 1995). A less technical introduction is given in J.-M. Lehn and P. Ball, 'Supramolecular Chemistry', in N. Hall (ed.), *The New Chemistry* (Cambridge: Cambridge University Press, 2000).

The 'signal-transducing' synthetic molecular receptor is described in R. Krauss, H.-G. Weinig, M. Seydack, J. Bendig, and U. Koert, 'Molecular Signal Transduction through Conformational Transmission of a Perhydroanthracene Transducer', *Angewandte Chemie International Edition,* 39 (2000), 1835.

الفصل السابع: الكمبيوتر الكيميائي: المعلومات الجزيئية

John Hopfield speaks about biological existence theorems in the text of a talk entitled 'Biological information processing and molecular nanocomputing', given at the *Nature* conference on nanotechnology, Tokyo, January 1992.

The work of Leslie Orgel and others on replicating molecules is discussed in L. Orgel, 'Molecular Replication', *Nature,* 358 (1992), 203.

Günter von Kiedrowski reported his molecular replicators in G. von Kiedrowski, 'A Self-Replicating Hexadeoxynucleotide', *Angewandte Chemie International Edition,* 25 (1986), 932.

Nadrian Seeman's DNA cages are described in J. Chen and N. C. Seeman, 'Synthesis from DNA of a Molecule with the Connectivity of a Cube', *Nature,* 350 (1991), 631; Y. Zhang and N. C. Seeman, 'The Construction of a DNA Truncated Octahedron', *Journal of the American Chemical Society,* 116 (1994), 1661.

Chad Mirkin and colleagues reported their DNA-based method of nanoparticle assembly in C. A. Mirkin, R. L. Letsinger, R. C. Mucic, and J. J. Storhoff, 'A DNA-Based Method for Rationally Organizing Nanoparticles into Macroscopic Materials', *Nature,* 382 (1996), 607.

The peptides that recognize different semiconductor surfaces are described in S. R. Whaley, D. S. English, E. L. Hu, P. F. Barbara, and A. M. Belcher, 'Selection of Peptides with Semiconductor Binding Specificity for Directed Nanocrystal Assembly', *Nature,* 405 (2000), 665.

The molecule-based logic devices built by Jim Heath and coworkers are described in C. P. Collier *et al.*, 'Electronically Configurable Molecular-Based Logic Gates', *Science,* 285 (1999), 391.

The rotaxane-based logic device is reported in A. Credi, V. Balzani, S. J. Langford, and J. F. Stoddart, 'Logic Operations at the Molecular Level: An XOR Gate Based on a Molecular Machine', *Journal of the American Chemical Society,* 119 (1997), 2679.

The measurement of the electrical conductivities of single molecules is described in M. A. Reed, C. Zhou, C. J. Muller, T. P. Burgin, and J. M. Tour, 'Conductance of a Molecular Junction', *Science,* 278 (1997), 252; M. A. Reed and J. M. Tour, 'Computing with Molecules', *Scientific American* (June 2000), 86. Molecules that perform arithmetic are described in A. P. de Silva and N. D. McClenaghan, 'Proof-of-Principle of Molecular-Scale Arithmetic', *Journal of the American Chemical Society,* 122 (2000), 3965.

Leonard Adleman's proposal for DNA computing is described in L. M. Adleman, 'Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems', *Science,* 266 (1994), 1021; L. M. Adleman, 'Computing with DNA', *Scientific American* (August 1994), 54.

قراءات إضافية

Atkins, P. W. *Atoms, Electrons, and Change* (New York: W. H. Freeman & Co., 1991).

______ *Molecules* (New York: W. H. Freeman & Co., 1991).

Ball, P., *Designing the Molecular World: Chemistry at the Frontier* (Princeton: Princeton University Press).

Emsley, J. *Molecules at an Exhibition* (Oxford: Oxford University Press, 1998).

Goodsell, D., *The Machinery of Life* (New York: Springer–Verlag, 1993).

______ *Our Molecular Nature: The Body's Motors, Machines and Messages* (New York: Springer–Verlag, 1996).

Hall, N. (ed.), *The Age of the Molecule* (London: Royal Society of Chemistry, 1999).

______ (ed.), *The New Chemistry* (Cambridge: Cambridge University Press, 2000).

Hoffmann, R., *The Same and Not the Same* (New York: Columbia University Press, 1995).

مصادر الصور

(1–5)a IBM Corporation, Research Division, Almaden Research Center. From Ohtani *et al. Physical Review Letters* 60, 2398 (1988).

(1–5)b IBM Corporation, Research Division, Almaden Research Center. From Lippel *et al. Physical Review Letters* 62, 171 (1989).

(1–5)c David Thomson, University of Manitoba. From McGonigal *et al. Applied Physics Letters* 57, 28 (1990).

(1–7) © Oxford University Press 2001. Reprinted from Arthur M. Lesk, *Introduction to Protein Architecture,* by permission of Oxford University Press.

(1–8) Reprinted from David S. Goodsell, *Our Molecular Nature* (Copernicus, 1996) by permission of the author.

(1–10) Achim Müller, University of Bielefeld.

(2–1) © Oxford University Press 2001. Reprinted from Arthur M. Lesk, *Introduction to Protein Architecture,* by permission of Oxford University Press.

(3–1) Larry Brownstein/Photodisc.

(3–3) E. R. Degginger/Science Photo Library.

(3–6) © Alexey Khodjakov, Wadsworth Center, Albany, New York.

(3–8) P. J. F. Harris and Malcolm Green, University of Oxford.

(4–1) K. R. Porter/Science Photo Library.

(4–3) Andrew Webber, Arizona State University.

(5–1) Sandia National Laboratories, S&T Dept, SUMMiT Technologies, www.mems.sandia.gov.

(5–5) Kazuhiko Kinosita, Keio University.

(5–7) Stanislas Leibler, Princeton University.

(5–8) © Montemagno Research Group, 2000.

(7–2) Nadrian Seeman, New York University.